

HIAF工程进展及 重离子加速器重大应用

杨建成

中国科学院近代物理研究所

兰州, 2024/12/28

汇报提纲

1 HIAF工程简介和进展

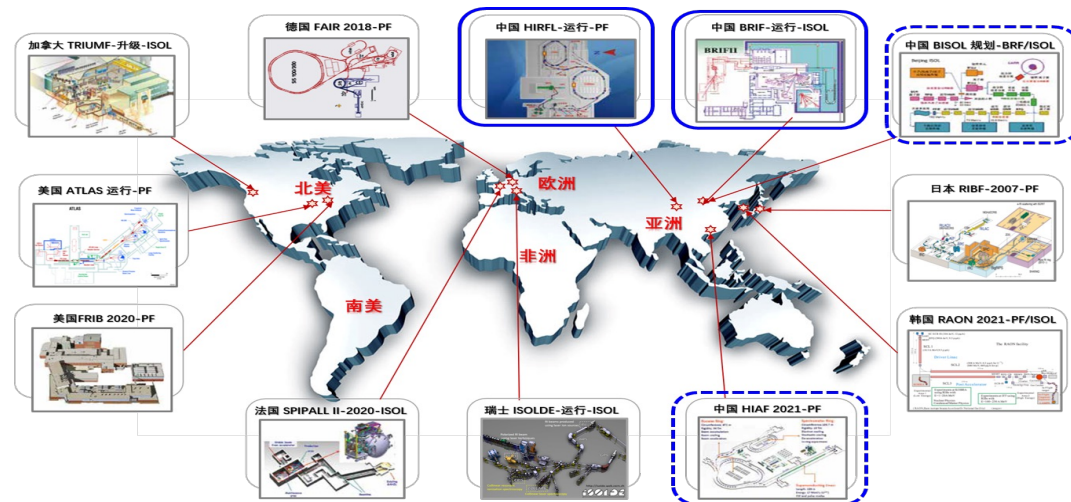
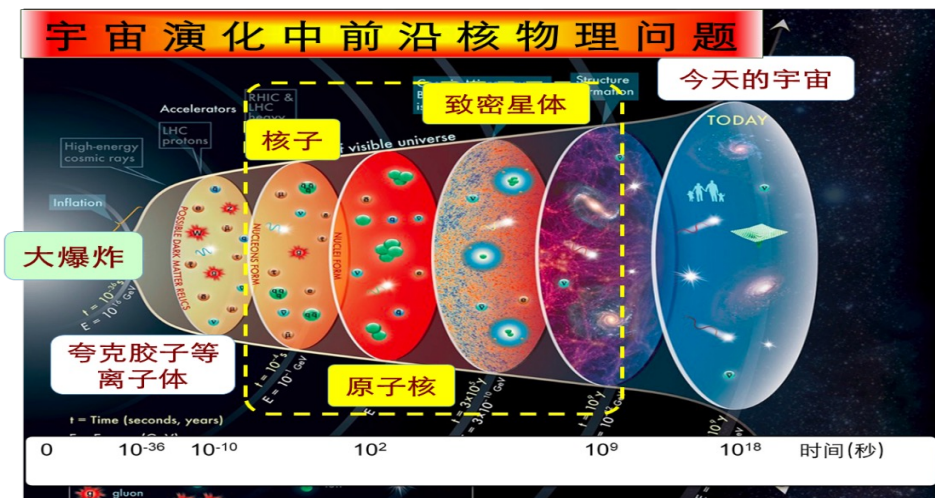
2 HIAF装置实验终端

3 重离子加速器重大应用

4 总结和展望

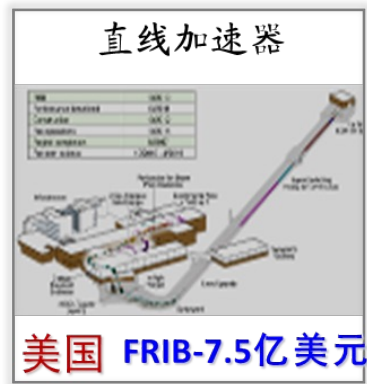
1 HIAF工程简介和进展

核物质起源、结构、性质和演化的研究是物质科学前沿



离子碰撞是实验室产生和研究核物质的最佳手段之一

世界科技强国正在或者计划建造下一代强流离子加速器大科学装置



通过高流强、高能量、高功率抢占基础前沿研究制高点！

强流重离子加速器-HIAF

《国家重大科技基础设施建设中长期规划(2012 - 2030)》国发〔2013〕8号(2013年1月16日国务院常务会议通过) 优先安排重大科技基础设施之一。

总投资30亿人民币, 2018年12月开工, 建设周期7年, 选址广东省惠州市



HIAF能提供国际上脉冲流强最高的重离子束流和精度最高的核质量环形谱仪, 将使我国重离子核科学研究从过去的“紧跟”和“并行”, 最终实现“引领”, 形成在国际上具有重大影响的重离子科学研究中心

新一代强流离子加速器

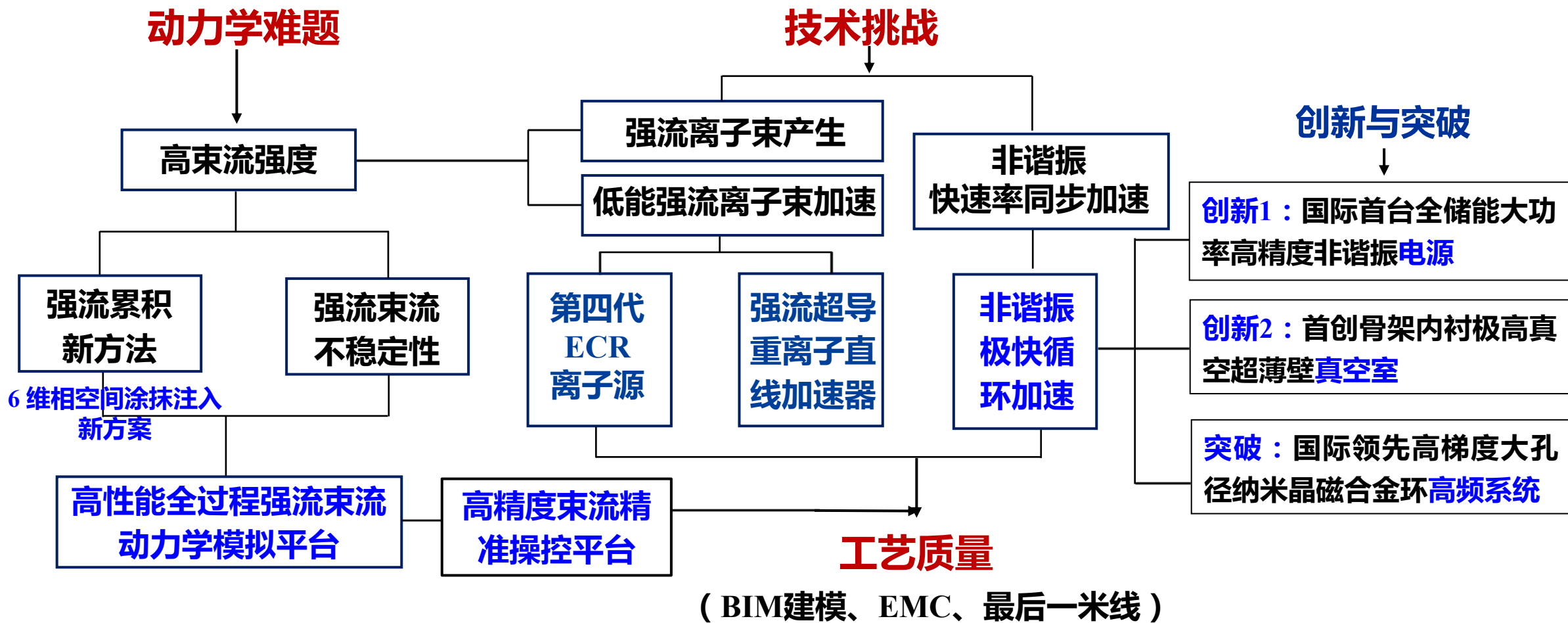
面临一系列动力学难题和技术挑战！

这也是

国际强流离子加速器的前沿课题！

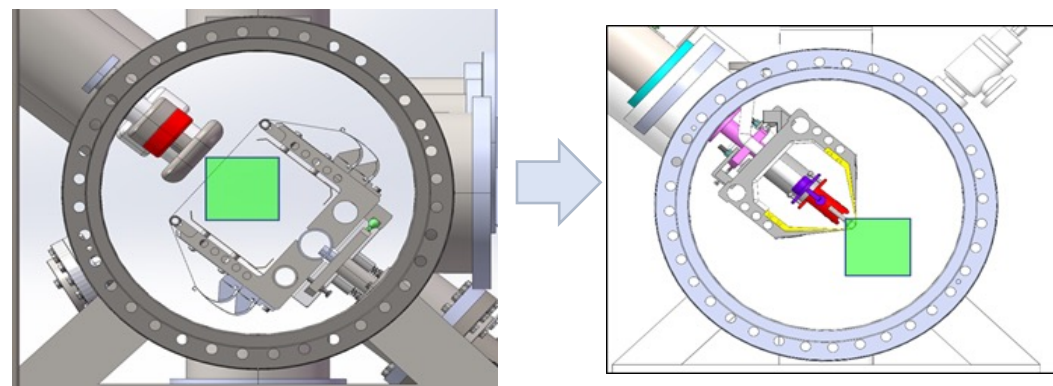
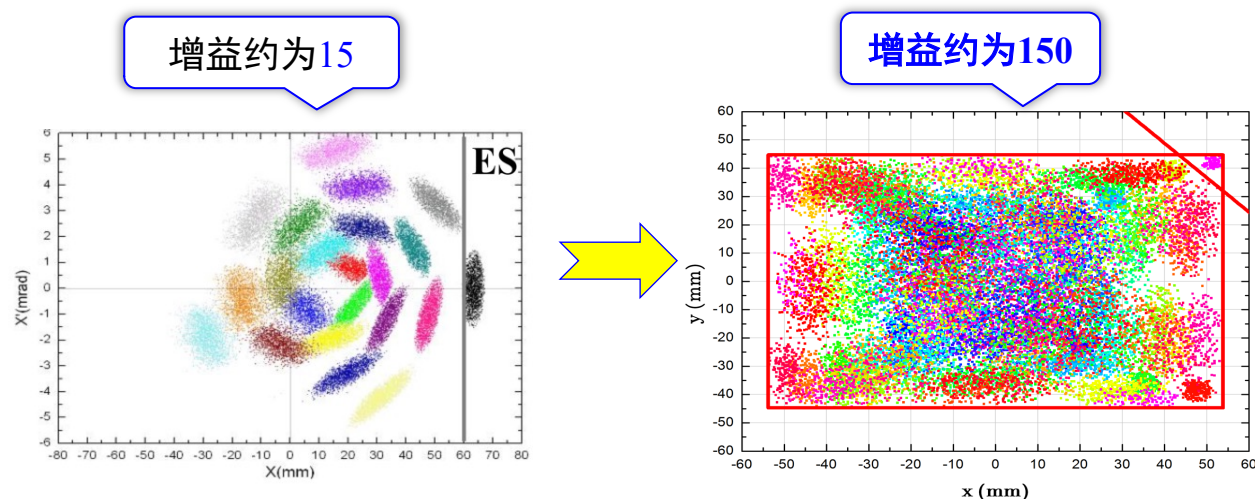
束流动力学和核心关键技术

国际上脉冲流强最高的重离子束流和精度最高的核质量环形谱仪，无成熟方案可借鉴



动力学方案创新，核心技术攻关，工艺质量提升

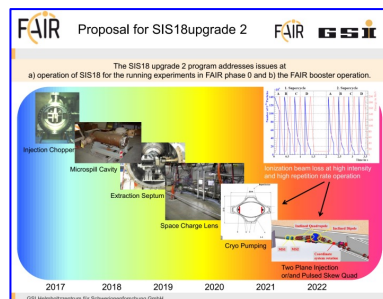
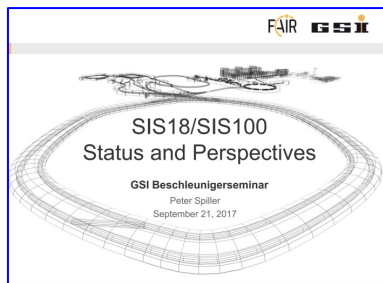
提出并设计基于 Corner Septum 4 维相空间重离子束流涂抹累积新方案，充分利用垂直相空间，可将重离子束流累积增益提高 8-10 倍，达国际最高脉冲流强



国际多圈注入方案-2维相空间

4 维相空间Painting方案

方案已经被德国FAIR大科学工程升级方案采用



- 高均匀度异型结构静电场设计和测量
- 多电极陶瓷支撑架方案
- 高精度异形陶瓷制造工艺

Corner Septum 静电偏转板

解决了传统静电偏转板循环束流扫丝损失问题

强流束流动力学：高性能全过程强流束流动力学模拟平台

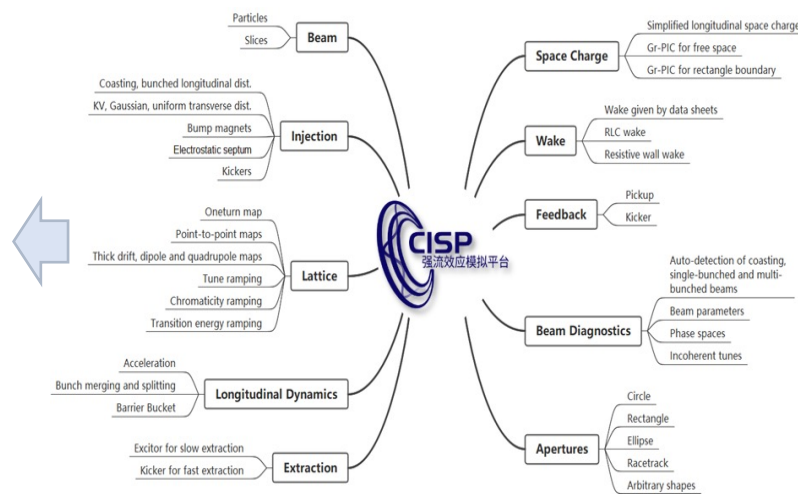


研发了国际首个从注入到引出全过程束流动力学耦合效应高精度模拟平台-CISP

CISP 创新点

(Simulation Platform for Collective Instabilities)

- 全过程复杂动力学耦合效应模拟功能
- 具备创新技术全新工艺设备建模功能
- 基于人工智能和数字孪生的机器学习



CISP主站点

CISP Application
Simulation Platform for Collective Instabilities

[Main Page](#) | [Downloads](#) | [Documents](#) | [Contact Me](#)

Introduction
CISP (Simulation Platform for Collective Instabilities) is a scalable multi-macroparticle simulation code built with C++ and Python via OOP technology. Its functions or capabilities are as follows:

- Linear or nonlinear transverse dynamics with chromaticity.
- Longitudinal dynamics including acceleration, bunch merging and splitting, barrier bucket with rf cavities.
- FFT-PIC and FD-PIC space charge simulation.
- Arbitrary monopole longitudinal wake.
- Arbitrary dipole transverse wake.
- Intra-beam scatter effects for gaussian distribution beams.
- DC electron cooling simulation.
- Simplified linear and no-noise transverse feedback system.
- Single-bunched, multi-bunched and coasting beam supporting 10^6 macroparticles.
- Gaussian, uniform, KV, parabolic, water-bug distribution in the transverse direction.
- Gaussian, coasting, uniform distribution in the longitudinal direction.
- User-friendly, flexible command file and data files.
- Automatically-generated data reports and figures.
- A very good usability.

CISP can run at Windows, Linux and macOS operating system now. But this website only provides the binary editions of the CISP for Windows operating system.

Update to Version 6.6.0 for at least 100x wake calculation performance, all kinds of apertures, and dispersion.

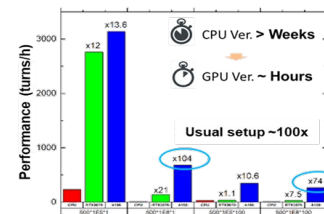
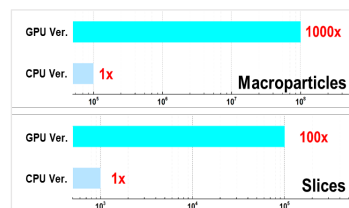
Created by Jie Liu, 02/10/2018, Updated 31/7



已通过网站向国际同行开放，已有来此欧洲核子中心等国际用户

GPU大规模并行计算

性能提升



- 宏粒子数从 10^5 提升到 10^8
- 切片数从 10^3 提升到 10^5
- 10~100倍加速
- 模拟噪声大幅减小

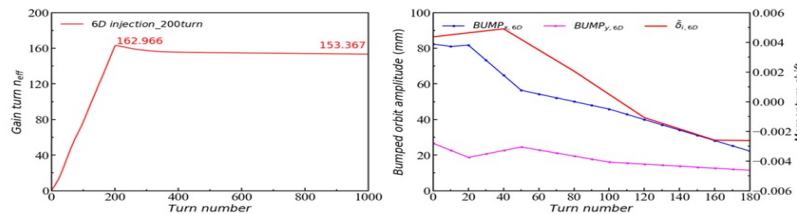
CISP：离子加速器束流动力学模拟研究重要平台，为我国离子加速器重大科技基础设施和重大应用装置建造和性能提升发挥了重要作用

基于模拟平台取得了一系列重要动力学和方案优化成果

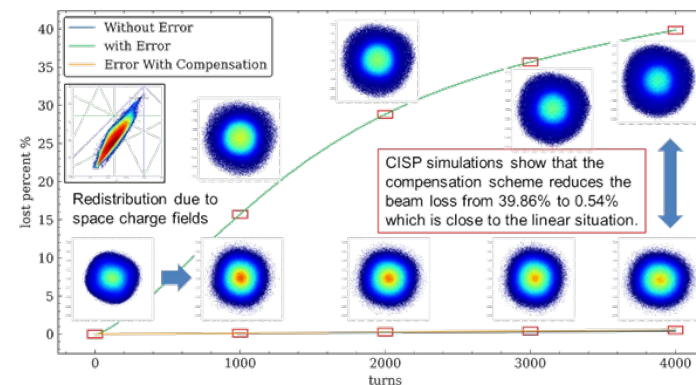
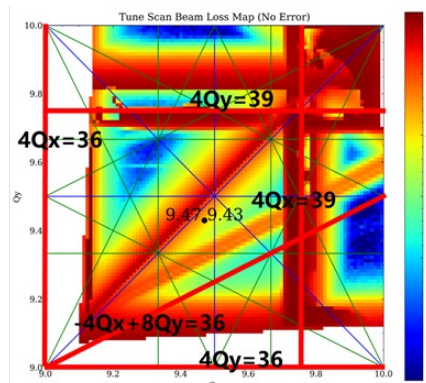


- 完成了6维相空间涂抹注入方案设计和优化，注入圈数提高超过一个量级

- 揭示了强流束流注入过程中快损失机制和慢损失机制，为涂抹注入共振补偿提供了重要的理论依据和基础

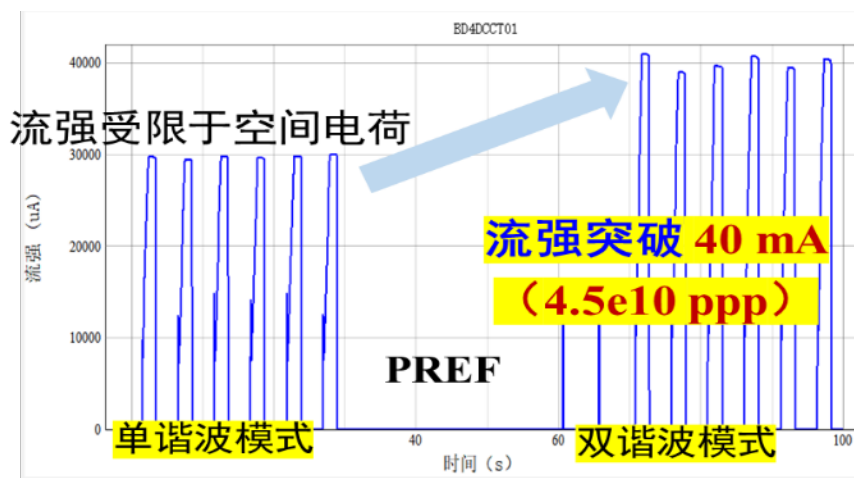
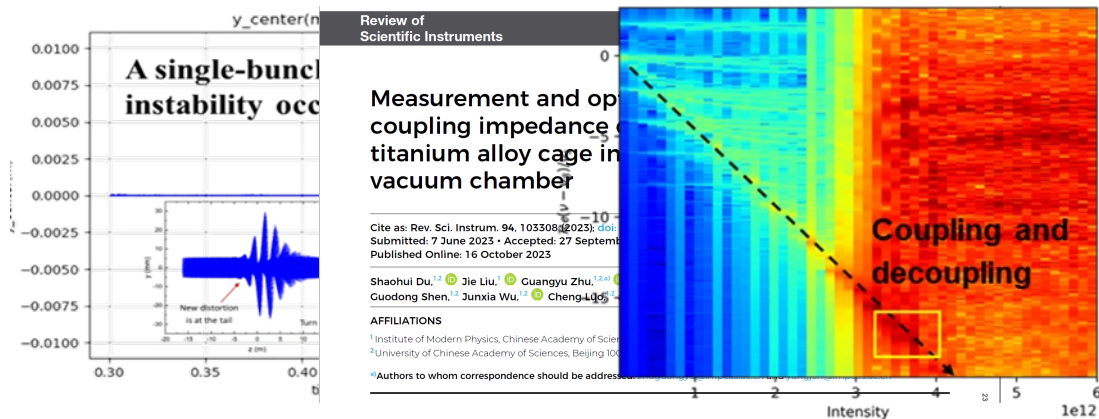


| 离子 | 涂抹方式 | 注入圈数 | 离子数 |
|---------|----------|------|----------------------|
| 238U35+ | 多圈-H | 23 | 2.3×10^{10} |
| | 多圈-V | 16 | 1.6×10^{10} |
| | 6维 H+V+S | 160 | 1.6×10^{11} |



- 首次开展了钛合金骨架超薄壁真空室阻抗研究，解决了极短尾场和长束团相互作用难题

- 纵向强流效应及多谐波对强流效应影响研究



双谐波俘获提升空间电荷限在PREF上得到实验验证！

创新突破了**12T/s (40000A/s)** 国际最快速率重离子非谐振加速技术，解决了我国重大科技基础设施HIAF工程**难题挑战**，为国际同类装置提供了**新方案**

非谐振极快循环加速



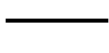
物理实验需求：高能量
克服强流束流不稳定性引起的束流损失：速度越快损失越小

现状：国际上尚未找到彻底解决方案

德国FAIR二极铁电源上升率20000A/s (300MW配电);
欧洲CERN 60MW 电源上升率11000A/s

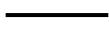
创新与突破

磁铁电源



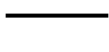
创新1：国际首台全储能大功率高精度非谐振电源

薄壁真空室



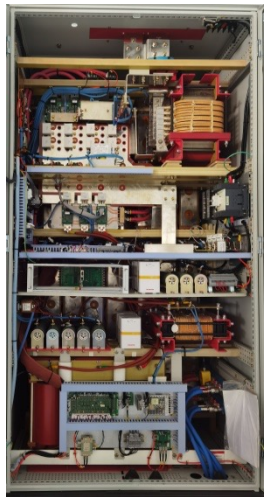
创新2：首创骨架内衬极高真空超薄壁真空室

高频系统



突破：国际领先高梯度大孔径纳米晶磁合金环高频系统

创新点-1：首次提出了变前励全储能拓扑结构，实现国际最快非谐振加速速率，解决了感性负载电源对电网冲击的难题



一代工艺（2018年）



二代工艺（2020年）



三代工艺（2022年）

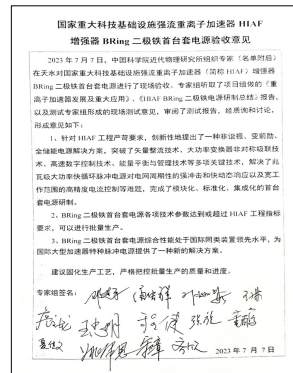


快脉冲全储能电源批量生产

- 从原理样机到全尺寸样机、再到**国际首台**大型非谐振全储能快循环脉冲电源，实现了**上升速率38kA/s、4kA脉冲电流输出**，**配电和消耗功率大幅下降（约一个量级）**

| 配电功率 (MVA) | 常规 | 全储能 |
|------------|-----|-----|
| BRing二极铁电源 | 180 | 15 |
| BRing四极铁电源 | 50 | 6 |
| BRing总配电 | 230 | 21 |
| HIAF总配电 | 297 | 88 |

配电功率由 **230MVA** 减小到 **21MVA**

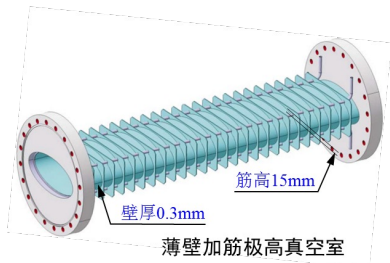


测试专家组：

“该电源为国际首台大型非谐振全储能快循环脉冲电源，综合性能处于国际同类装置领先水平。”

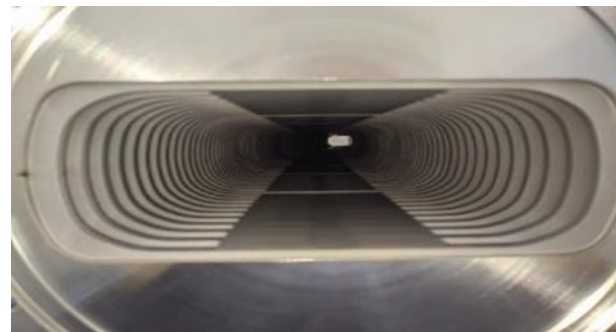
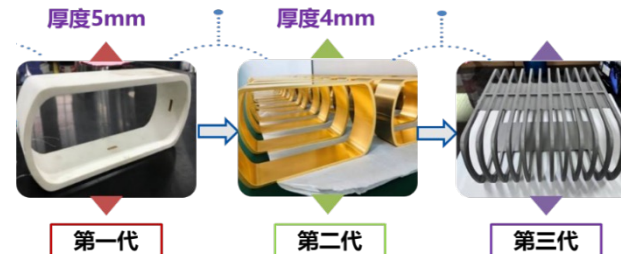
创新点-2：首次提出“骨架内衬”极高真空室方案，攻克技术和工艺难题，成功研制全尺寸样机，真空度 10^{-12} mbar，达国际领先水平

国际方案：薄壁加筋方案

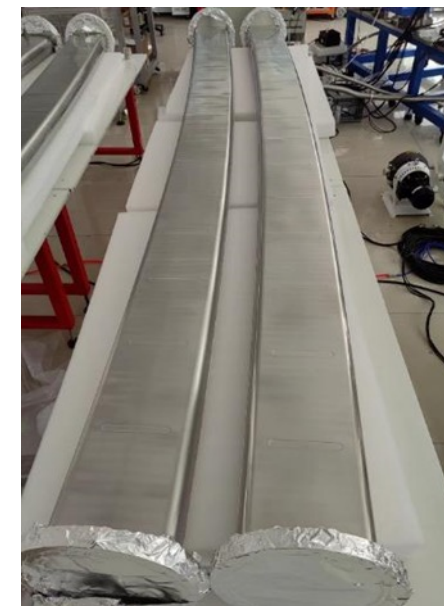


存在问题

- 钎焊高温烘烤脱落
- 筋高增加了磁铁气隙
- 造价昂贵的特殊P506钢

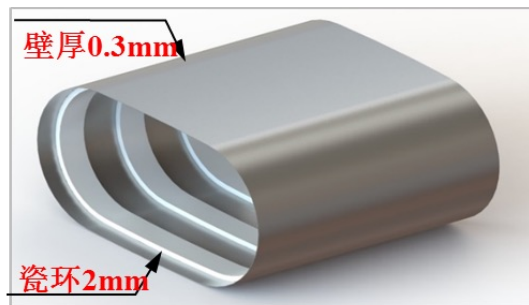


NEG镀膜钛合金骨架



二极铁真空室批量生产

中国方案：骨架内衬方案



- 耐高温烘烤、材料要求低
- 大幅减小磁铁气隙
- 降低磁铁造价~30%
- 减小配电功率

真空室研制得到欧洲核子CERN的大力支持

Dear all
 ok yes I see...if there are no resonances it could be due to the gold coating (very good) and the fact that the beam pipe is very thin and thus compressed by the vacuum pressure which make a good contact at the edge..thus we have the same functionality (assuring a good contact at the edge) as its normally done via the RF shoulder..
 Anyway you did an excellent job and this concept will be used in many future machines..
 you just need to invent a proper name now before others do it...since it looks a bit like a snake ..perhaps CHINESE DRAGON structure..?
 Happy new year to all of you
 REgards Fritz



这是一件非常出色的工作，这个概念将会被推广到将来很多加速器装置上，你们需要尽快给这种真空室命名，比如“中国龙结构”



欧洲核子中心（CERN）著名的加速器专家 Fritz Caspers 参加瓷环内衬真空室测试

突破-高梯度、宽频带、快响应油冷磁合金高频系统

多年探索研发，从小到大磁环，解决了从材料到工艺等核心技术难题，打破国外技术封锁与禁售，成功研制整体性能达到国际先进水平的高性能大尺寸液冷磁合金环

难题挑战

- 实现从质子到铀全粒子加速-宽频带
- 12T/s 上升速度，240kV电压
- 束团压缩电压上升沿小于10 μ s

传统铁氧体高频腔无法满足要求

技术路线

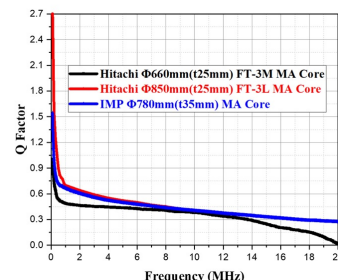
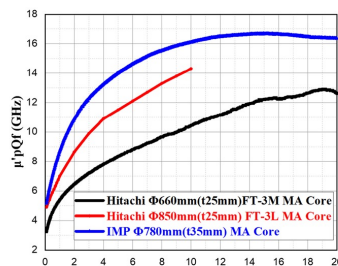
高梯度磁合金：高梯度(40kV/m)；宽频带（无需调谐）；快响应速度 (<10 us)

现状困境

只有日立公司能够生产高性能磁合金环，该环还可用于电力及核能相关设备等，所以对中国禁售，同时封锁核心工艺与关键技术。自主研发，突破关键技术

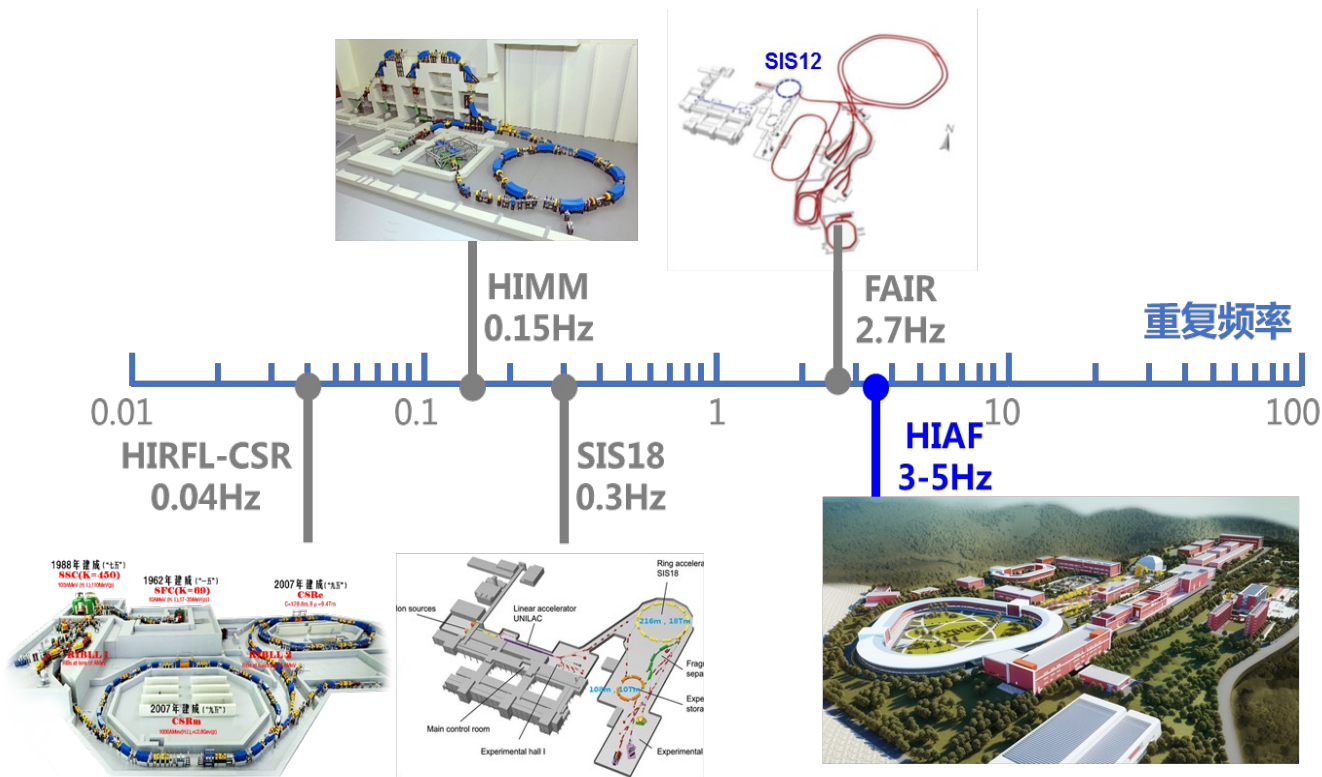


大尺寸纳米磁合金环在最具挑战的低频段(0.1-2MHz)性能超过国际公开报道的最好水平-国际领先



国内首台大尺寸油冷磁合金高频系统

解决了强流离子束流高增益累积和快速率加速难题，HIAF将实现12T/s国际最快非谐振加速速率，大幅减小空间电荷和动态真空束流损失，将达国际同类装置最高脉冲流强

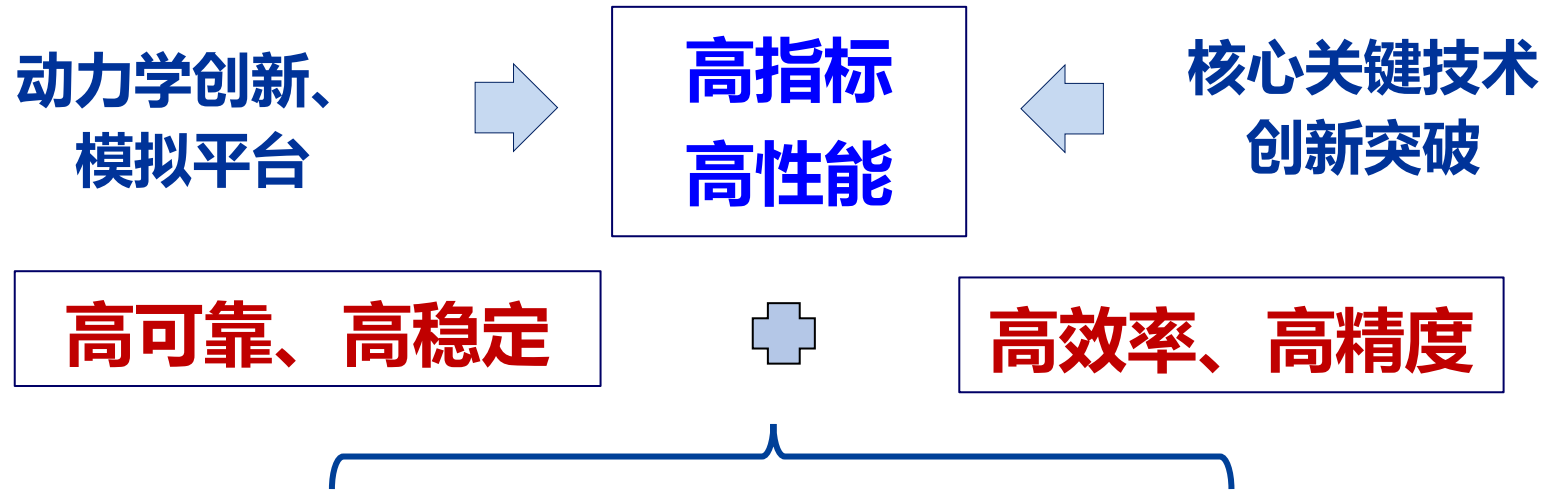


| 研究所 | 装置 | 设计流强 | 达到流强 | 离子种类 | 重复频率 |
|------|-------------|----------------------|--------------------|---------------------|-------|
| BNL | AGS Booster | — | 5×10^9 | Au^{32+} | — |
| CERN | LEIR | — | 9×10^8 | Pb^{54+} | — |
| JINR | NICA | 4×10^9 | — | Au^{32+} | — |
| GSI | SIS18 | 3.0×10^{10} | 3×10^{10} | U^{28+} | 2.7Hz |
| FAIR | SIS100 | 2.0×10^{11} | — | U^{28+} | — |
| IMP | HIAF-BRing | 2.0×10^{11} | — | U^{45+} | 3-5Hz |
| IMP | HIAF-SRing | 1.0×10^{12} | — | $\text{U}(45-92)^+$ | — |

比现有兰州HIRFL高1万倍，比德国FAIR高5倍

- 国际上脉冲流强最高的快循环重离子同步加速器、精度最高的核质量环形谱仪

工程工艺质量：



- **BIM工程建模和数字孪生：**

首次进行加速器工程全系统全过程BIM建模设计和施工

- **EMC标准和规范：**

率先开展加速器EMC的系统研究和工程应用

- **工程过程管理：**

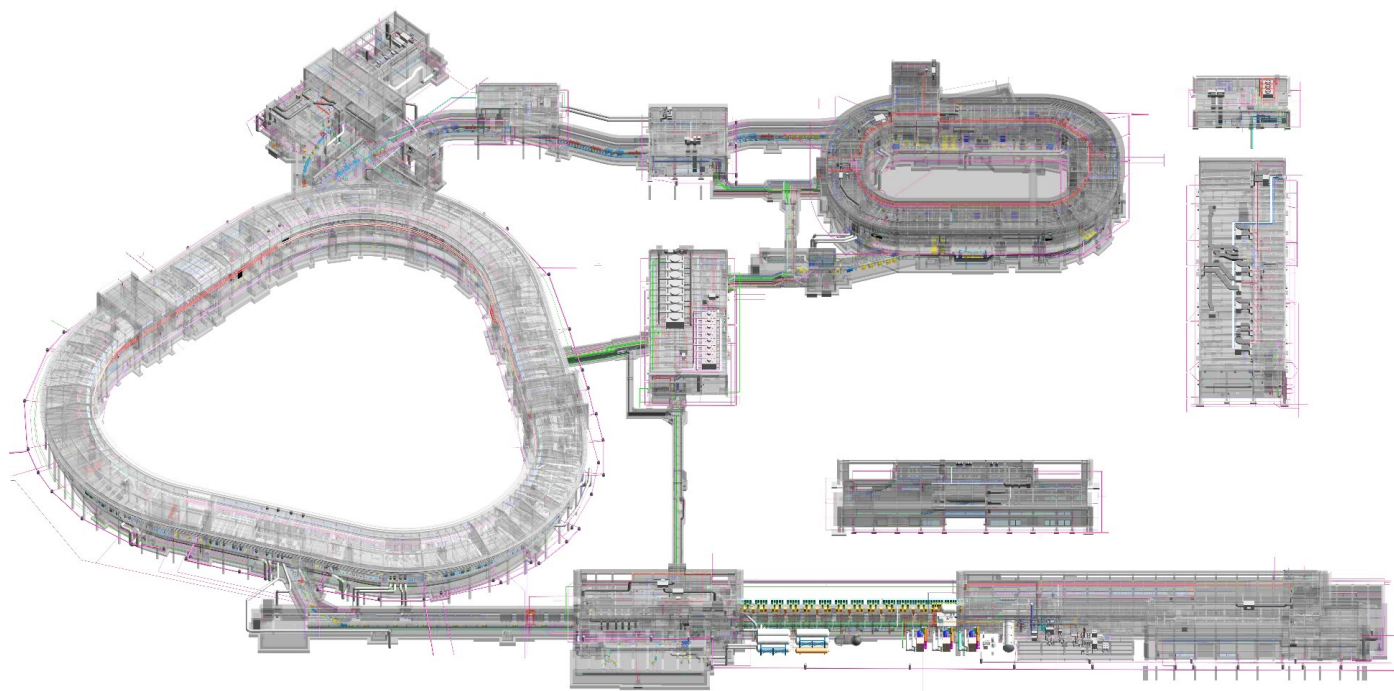
全系统（工程接口）
 全过程（工程工序）
 严规范（规范标准）
 重细节（精益求精）

- **工程最后一米线、工程样段制**

工程工艺质量：

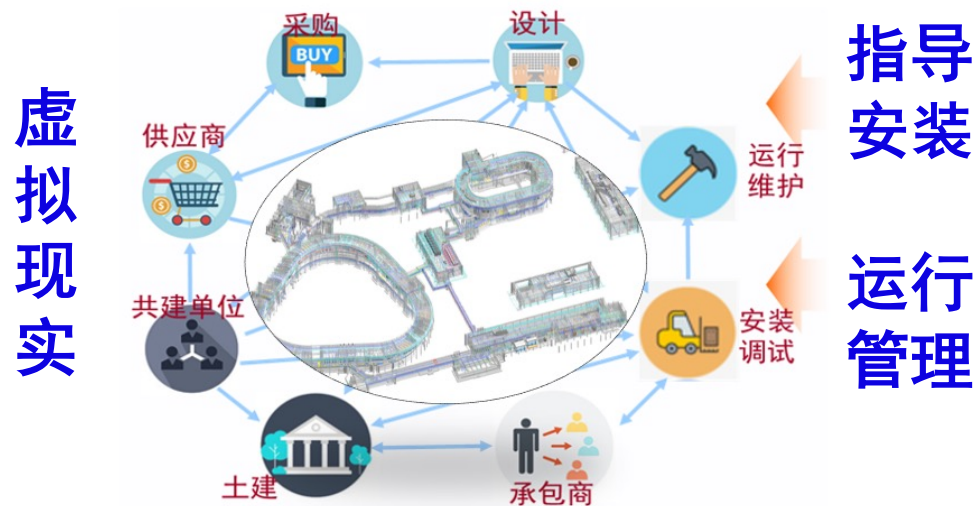
全系统BIM建模

- 在加速器工程中**首次开展**全系统**BIM**(Building Information Modeling)一体化正向建模，实现复杂工程系统的**标准化、规范化、可视化、集成化、信息化**的设计和工程管理



HIAF 工程全系统、全专业三维数字化平台

数字孪生样机



搭建集**设计、工艺、制造、安装和管理**一体的数字化平台-**直观、全面的“信息库”**

探索形成行业设计流程、标准规范、推广应用到国内外加速器设计领域

HIAF 全系统BIM建模 - 工程安装



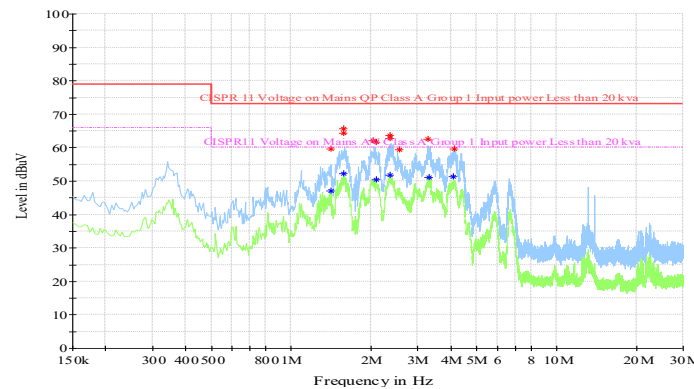
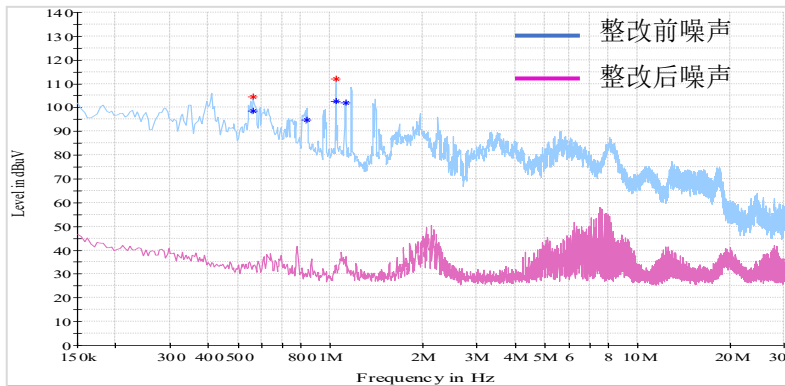
打破传统安装模式、点对点预制装配、提高安装效率和工艺质量

HIAF电磁兼容 - EMC

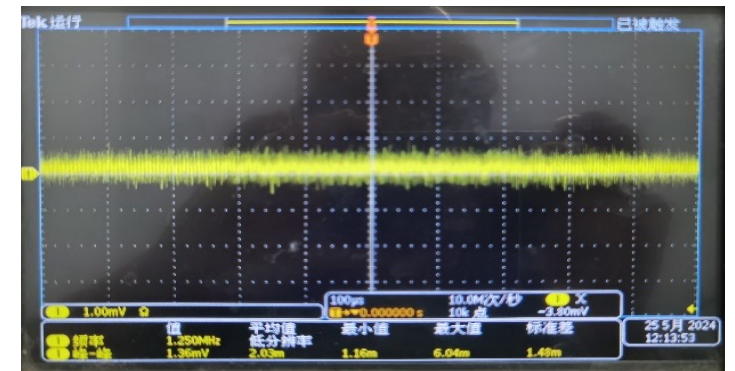
HIAF电磁兼容通过提前**整体规划、系统设计、模拟仿真**，**配套施工和设备测试**



EMC 测试噪声水平



敏感设备自测噪声水平



敏感信号线噪声水平不高于1mV，环境辐射发射水平满足GB4824要求

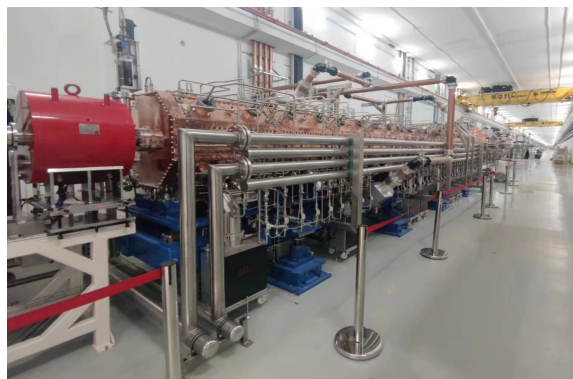
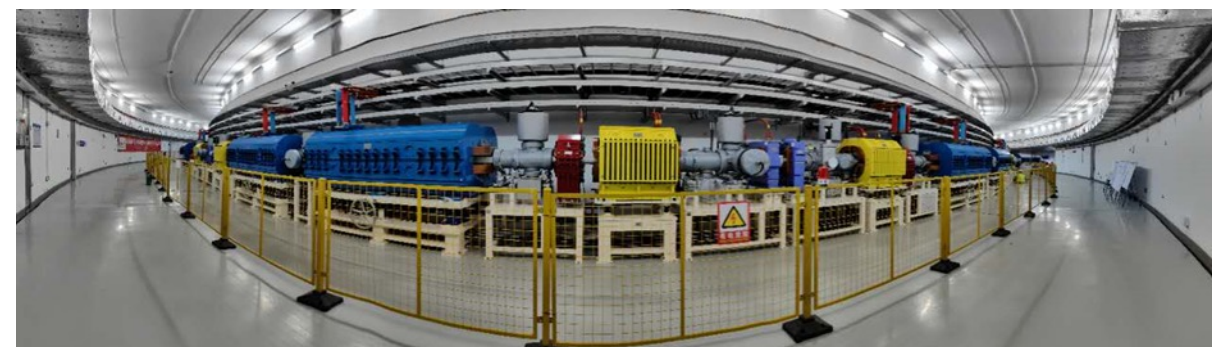
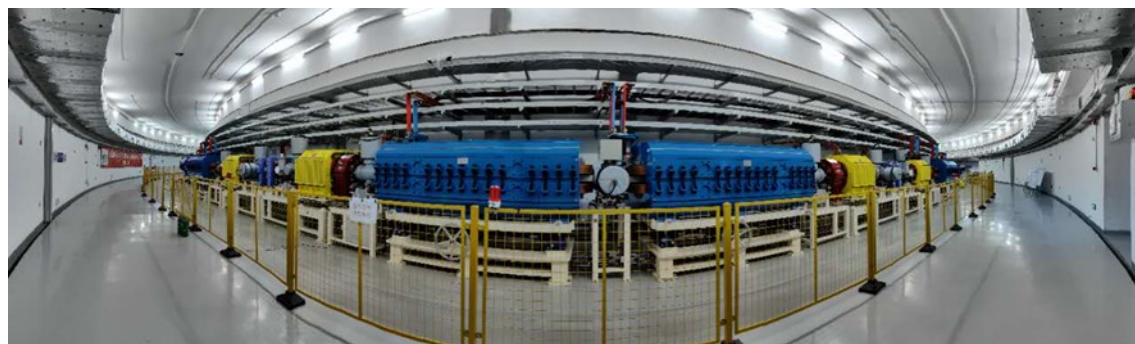
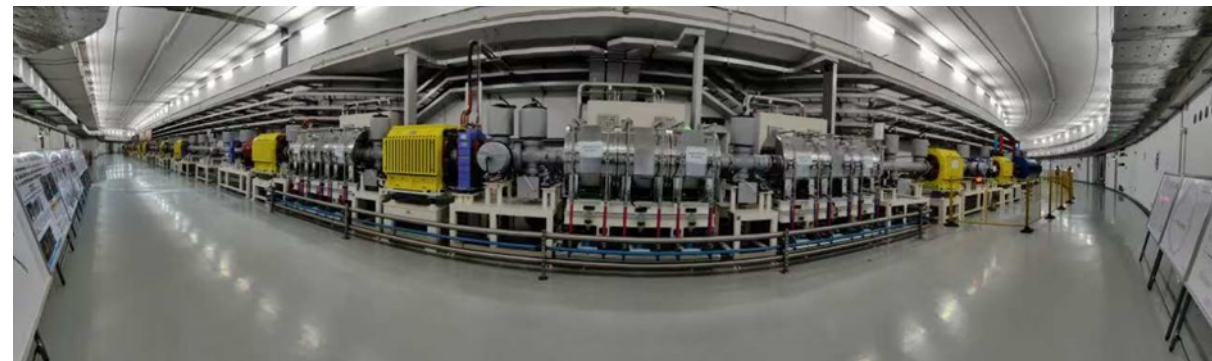
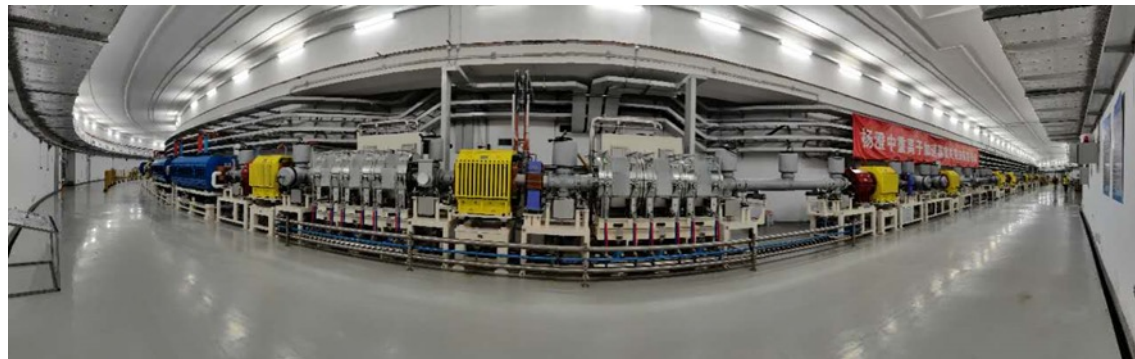
占地500亩，束线长度2.4km，地下13m隧道施工

**大型工艺设备6000台套，工艺线缆70万米；
核心设备100%国产**



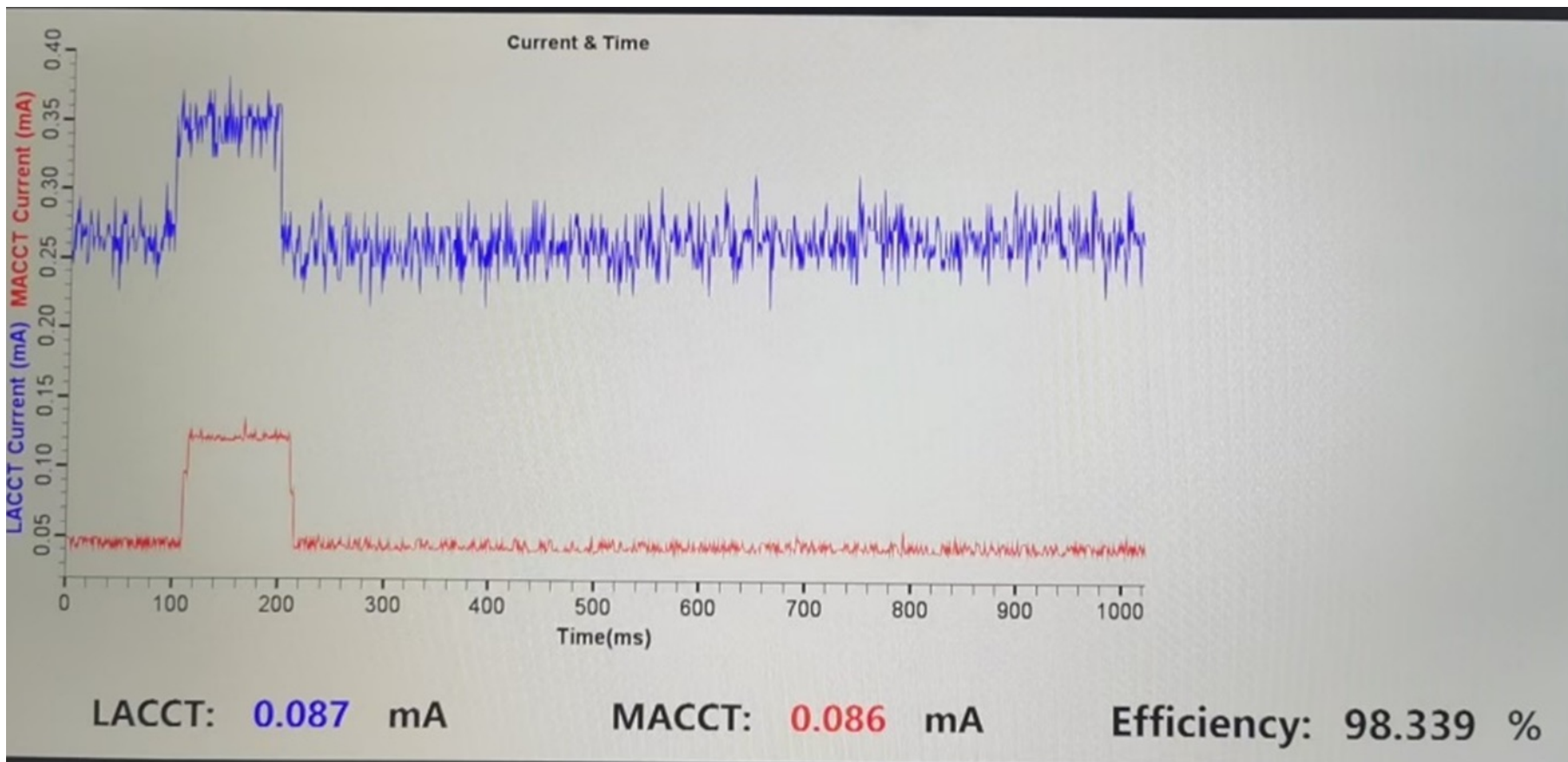
完成核心设备加工，2024年03月启动安装，8个月完成主体设备安装

HIAF 工程进展 - 隧道安装



2024正式调试出束，2025年完成国家验收

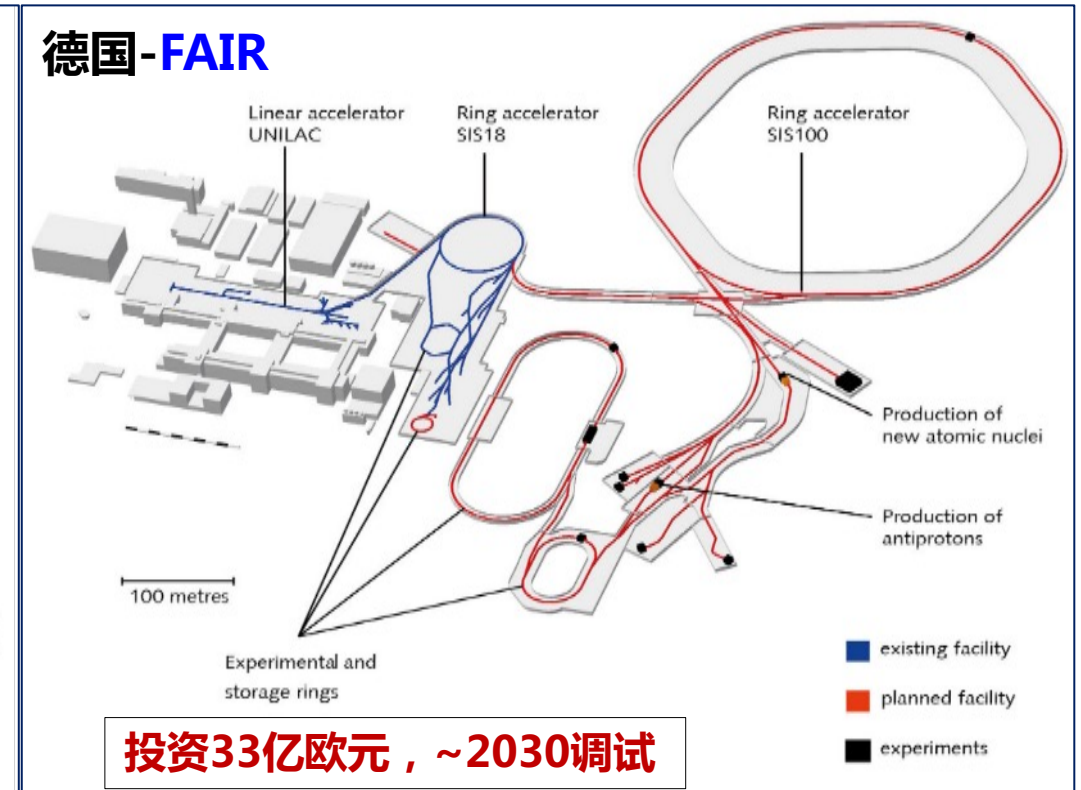
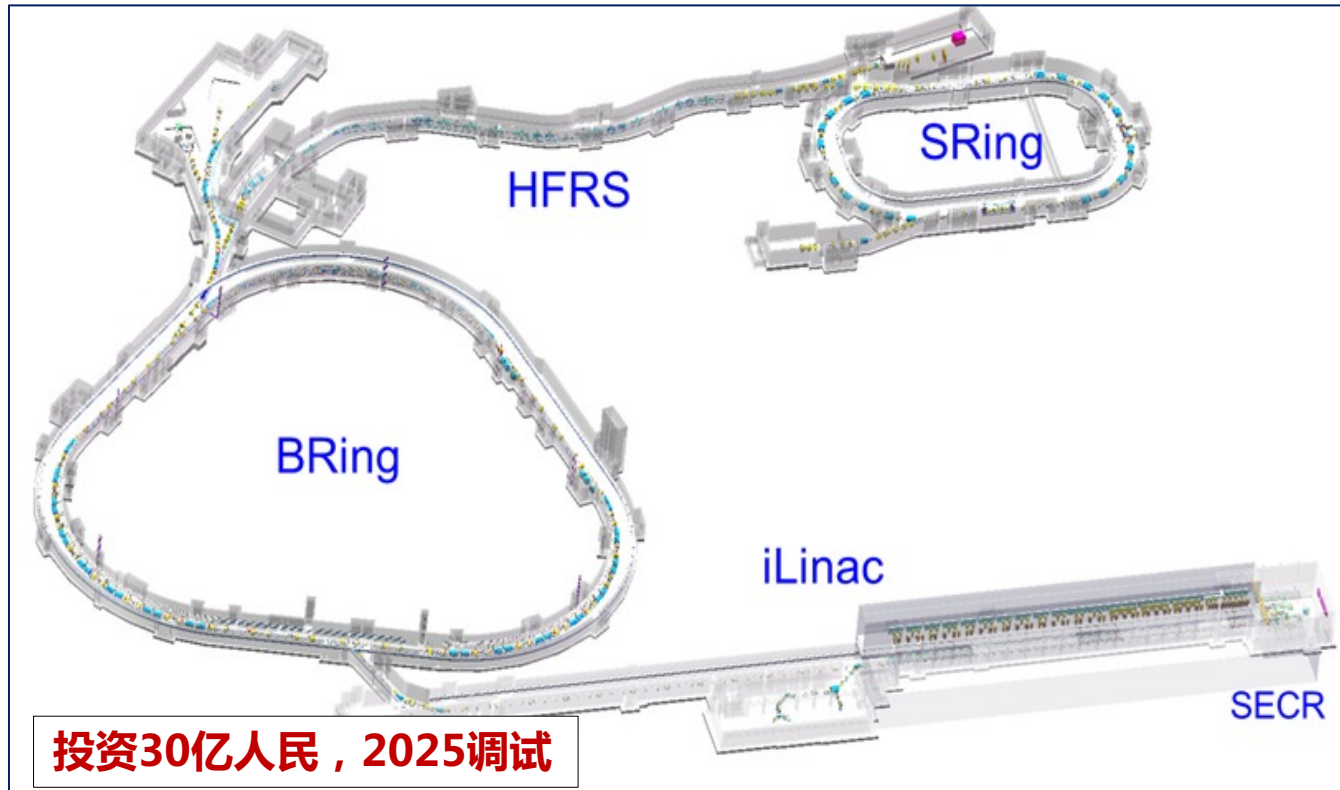
HIAF 常温前端成功出束-2024.10.25



100 e μ A左右¹⁶O⁶⁺束流在RFQ中的传输效率达到98%以上，加速效率达到87%以上，引出束流能量为0.804 MeV/u，达到设计指标

国家重大科技基础设施-强流重离子加速器 (HIAF)

- HIAF特色和优势：**束流指标和时间窗口**



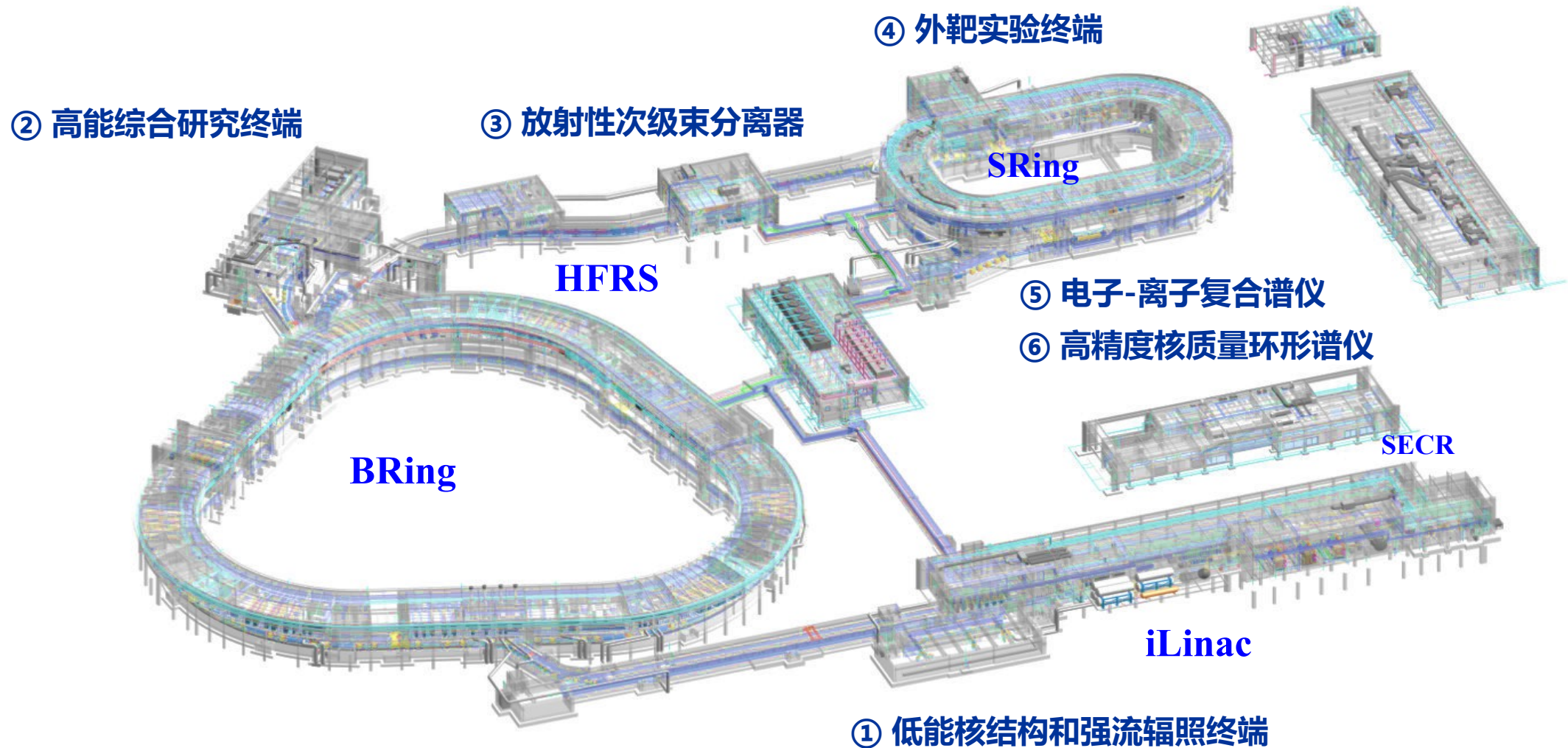
HIAF与FAIR是同期建设重离子加速器装置

为核物理、核天体物理、原子物理等基础研究以及重离子束重大应用研究提供国际领先实验平台，基于HIAF打造在国际上有重大影响的重离子科学研究中心

2 HIAF装置实验终端

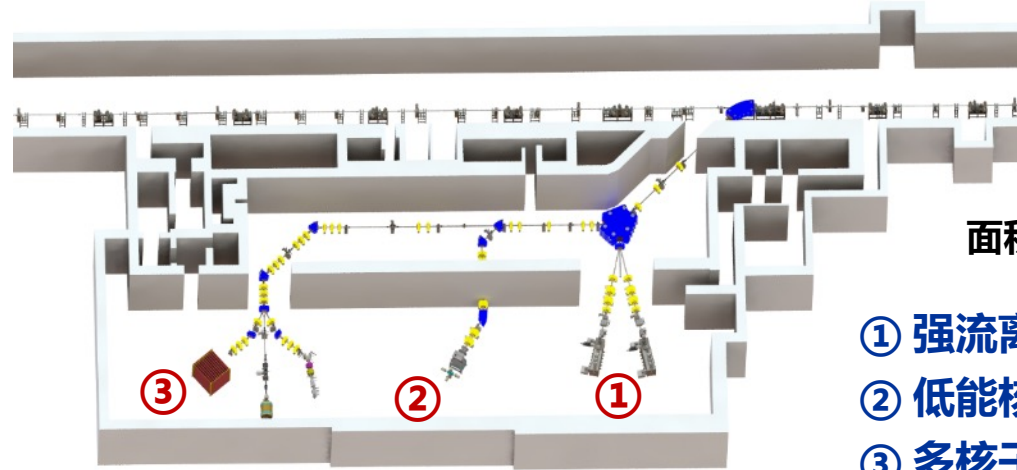
实验终端

强流超导直线iLinac、快循环同步环BRing与六大实验终端结合



终端1- 低能综合研究平台

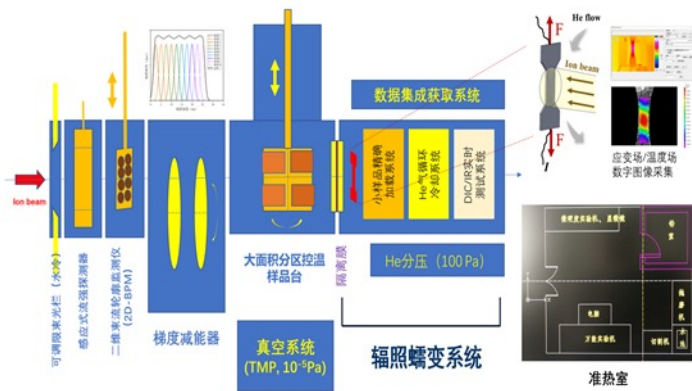
- **流强最高的低能CW重离子束流**
(U:15pμA、Kr:20pμA、Ar:60pμA)
- **分时并行供束，90%束流时间可用于该终端，年机时大于5000小时**



面积1500平米

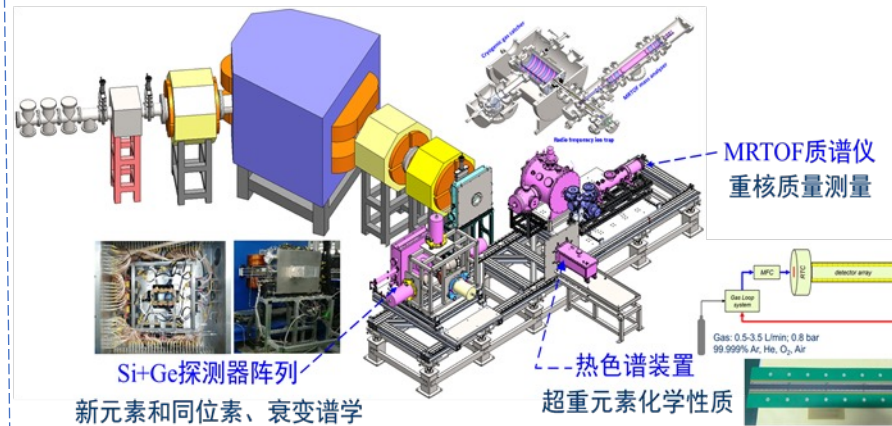
- ① 强流离子束辐照终端
- ② 低能核结构谱仪
- ③ 多核子转移反应终端

强流离子束辐照终端



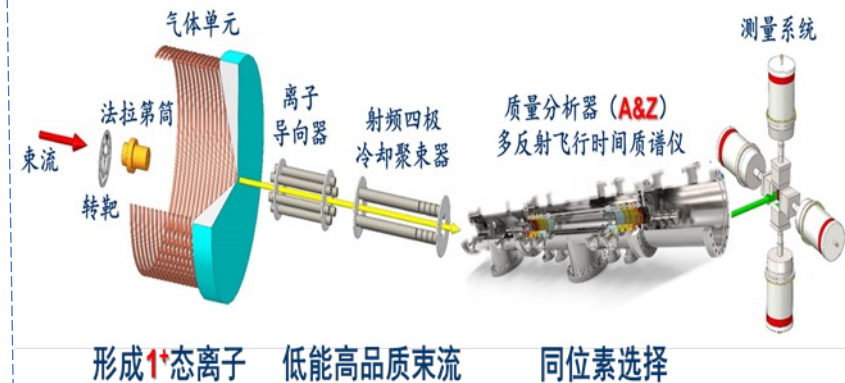
评价先进核能材料抗辐照性能

充气反冲谱仪终端



新元素和缺中子新核素合成、衰变谱学

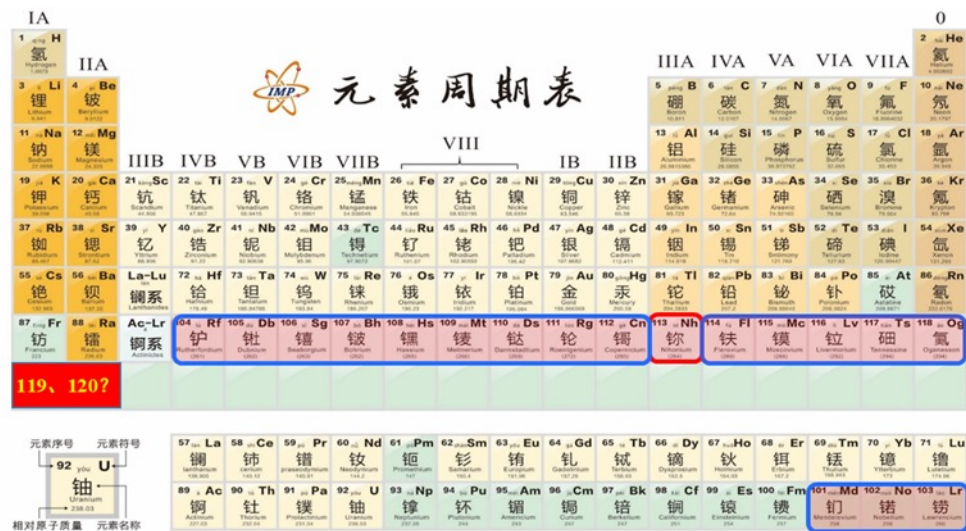
多核子转移反应终端



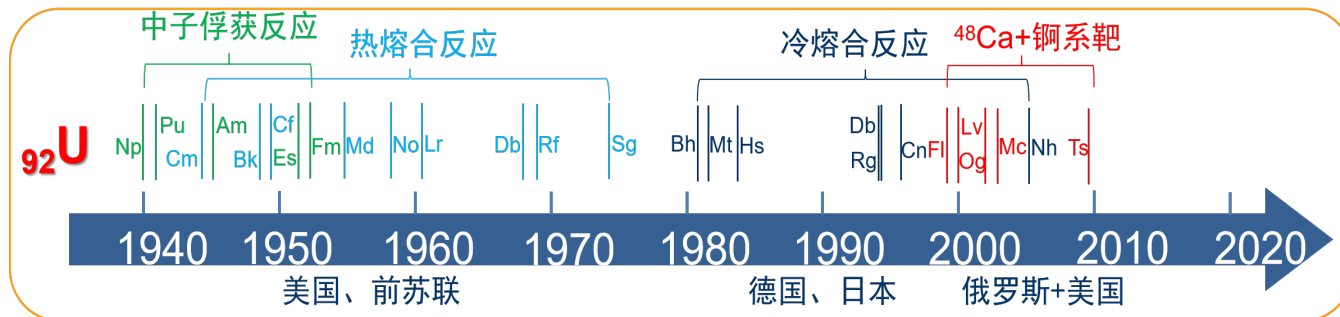
探索超重核稳定岛、理解宇宙中重元素起源

充气反冲谱仪 - 新元素合成

合成和鉴别新元素一直是核物理最具挑战性的前沿课题之一，新元素合成面临科学和技术的巨大挑战，近十多年**国际上无重大进展**！



100号之后的所有元素都是利用重离子加速器合成的



核心技术挑战:

fb产生截面的元素合成，高束流强度，高分离效率

以国家命名的元素:

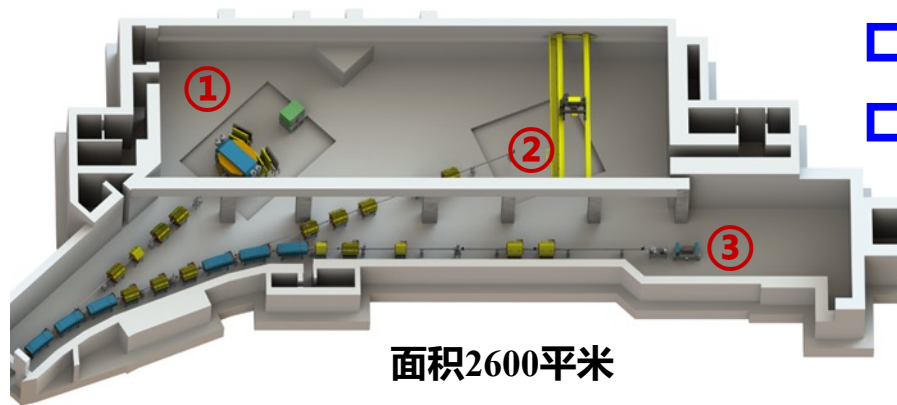
- 钌, Ruthenium, 俄罗斯
- 锗, Germanium, 德国
- 钋, Polonium, 波兰 (居里夫人)
- 钫, Francium, 法国
- 镅, Americium, 美国
- 鈰, Nihonium, 日本

现状: 目前俄罗斯JINR, 日本RIKEN正在研究新元素119号或120号; 德国正在建造超重核研究专用加速器; 美国、法国正在讨论建设专用加速器。

HIAF+CAFE

能否率先合成119、120号元素，将五星红旗插上元素周期表？

终端2- 高能综合研究平台



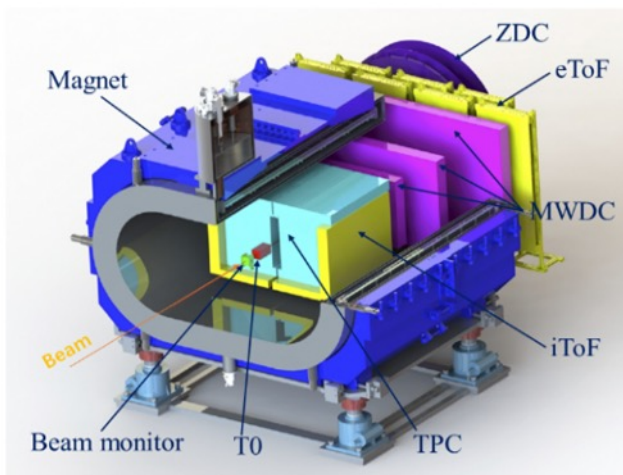
面积2600平米

- 宽能量范围全离子
- 强流高电荷态
- 高品质快、慢引出束流

- ① 核物质相结构终端
- ② 超核终端
- ③ 高能单粒子效应终端

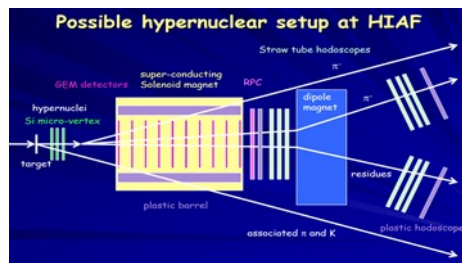
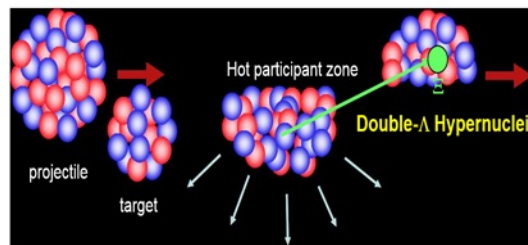
| 离子种类 | 能量 (GeV/u) | 流强 (ppp) |
|--|--------------|--|
| p | 9.3 | 6.0×10^{12} |
| $^{12}\text{C}^{6+}$ | 4.2 | 1.2×10^{12} |
| $^{78}\text{Kr}^{19+}$ | 1.7 | 6.0×10^{11} |
| $^{209}\text{Bi}^{31+}$ | 0.85 | 2.4×10^{11} |
| $^{238}\text{U}^{35+}$ | 0.835 | 2.0×10^{11} |

核物质相结构终端



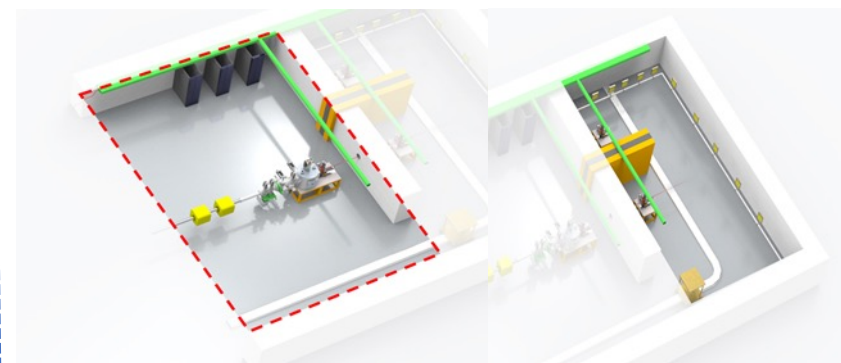
寻找QCD相变临界点

超核终端



研究超核性质、扩展超核存在版图

高能单粒子效应终端



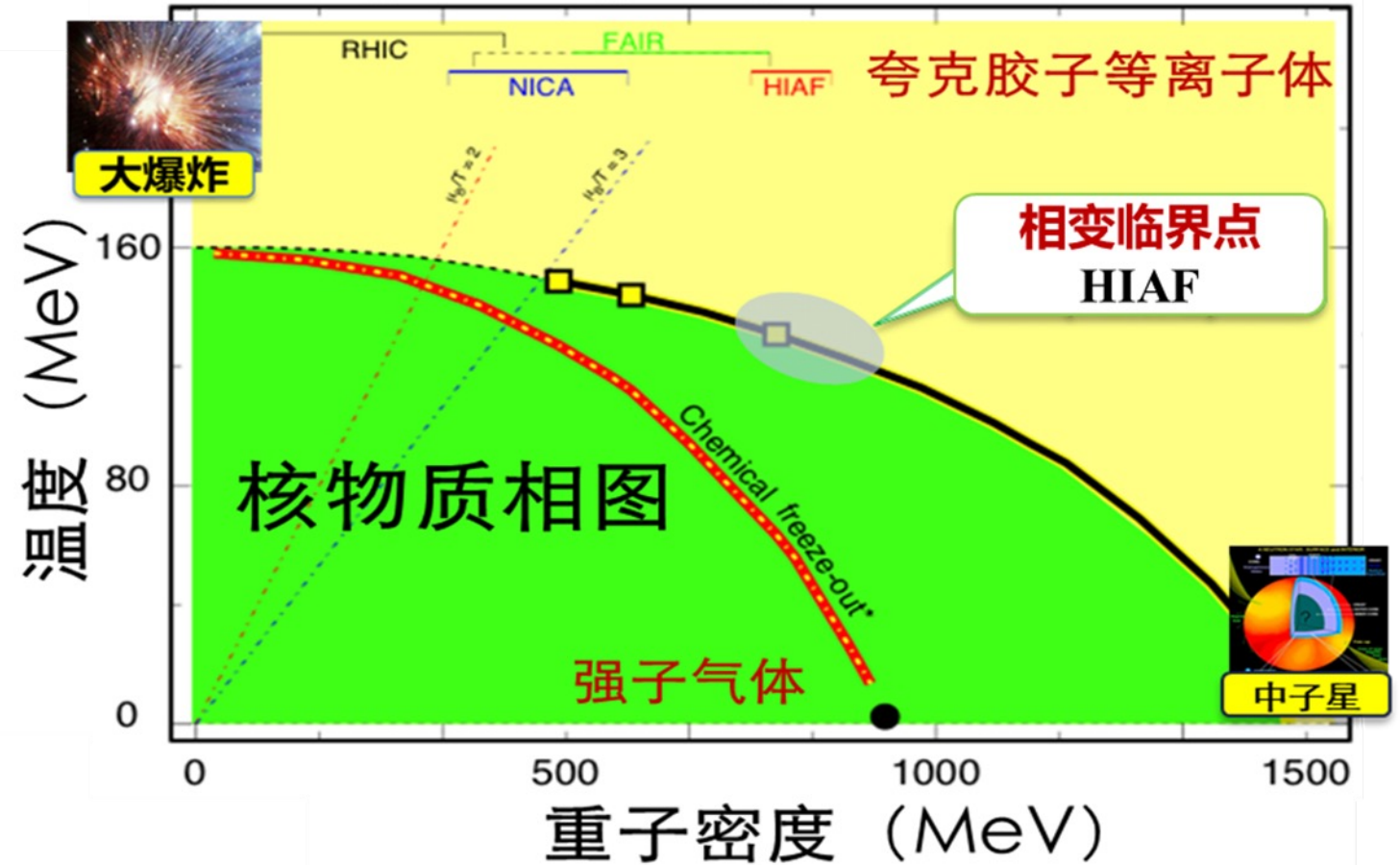
模拟整机和小卫星空间运行环境的综合、复杂辐射场

核物质相结构终端

相变临界点是研究核物质性质和理解强相互作用的基点，是核物质性能研究的圣杯，是目前世界主要的重离子实验室竞争的**前沿热点课题**

HIAF装置：为研究高重子密度区的核物质相结构提供了绝佳机遇

- **能量窗口**：填补2.5-4GeV能区核物质相结构数据空白
- **时间窗口**：美国RHIC、德国FAIR、俄罗斯NICA

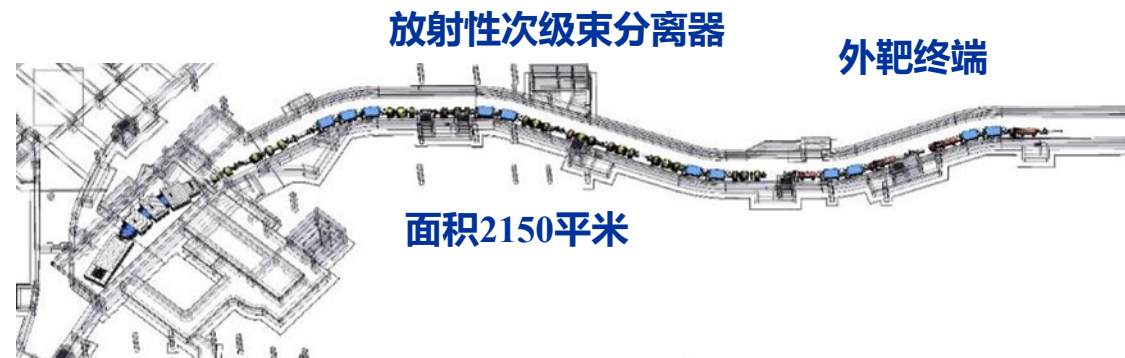


终端3 - 放射性束流线 HFRS+外靶终端



高磁刚度、大接受度、高分辨本领、多运行模式

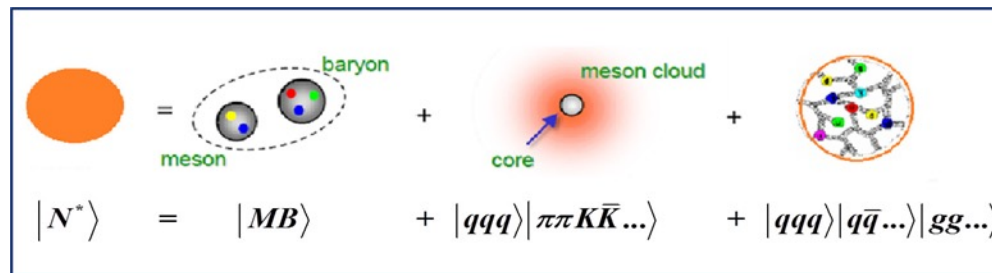
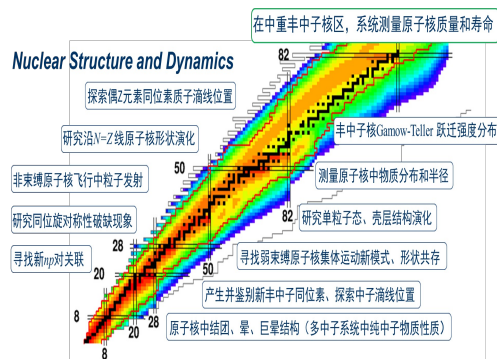
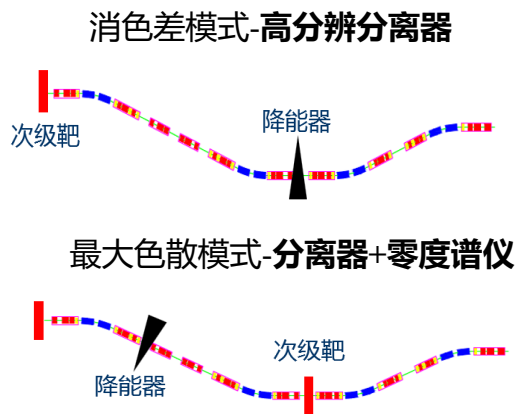
| | |
|----------------------------------|---|
| 磁刚度 | 25Tm |
| 角度接受度 | $\pm 30\text{mrad(H)} \pm 25\text{mrad(V)}$ |
| 动量接受度 | $\pm 2.0\%$ |
| 分辨本领 ($x = \pm 1\text{mm}$) | 预分离器：850 主分离器：700/1100 |



特色1：分离器与零度磁谱仪两种工作模式

特色2：磁刚度最高的放射性束线 - 25 Tm

独特实验：奇特核中核子激发态 (Δ , N^*) 性质研究

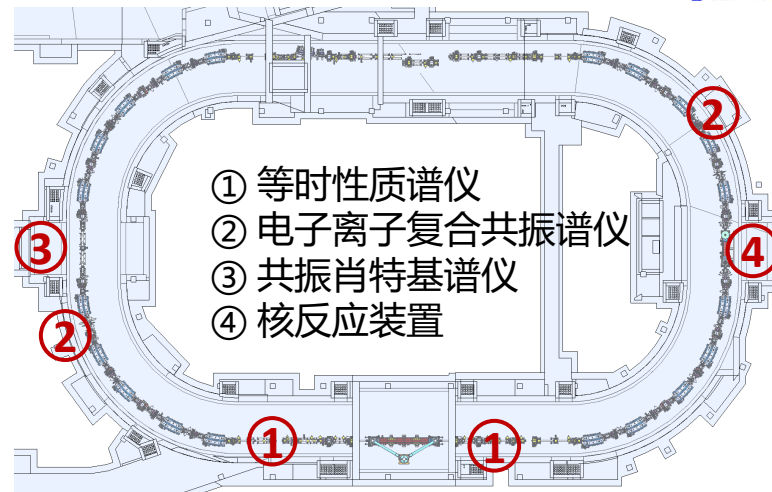


研究核子共振态的结构和性质，理解强相互作用的核介质效应等

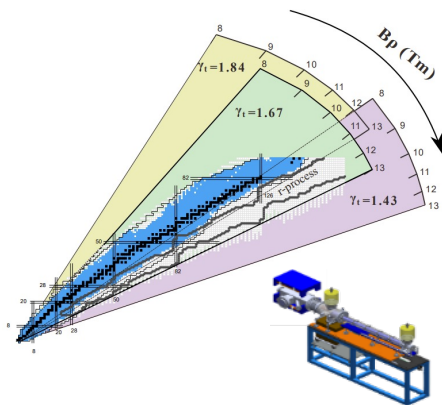
发现奇特核结构现象，认知核力；理解天体环境中的核过程

终端4- 高精度环形谱仪

- 国际上脉冲流强最高的初级束流强
- 多模式运行：等时性模式、内靶模式、正常模式、堆积模式
- 国际精度最高的环形核质量谱仪和首创基于双TOF的质谱术

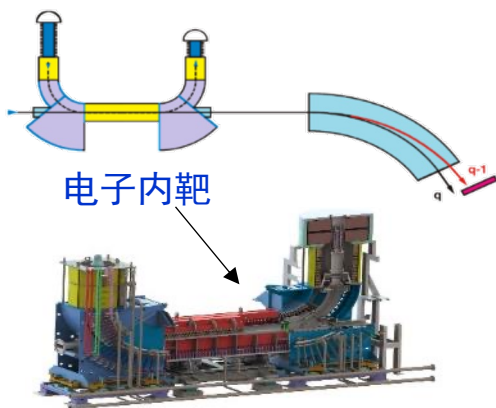


• 等时性质谱仪



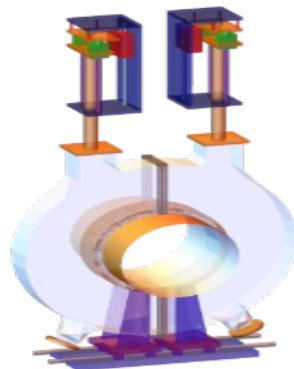
双TOF探测器，首创Bp-defined等时性质谱术

• 电子离子复合共振谱仪



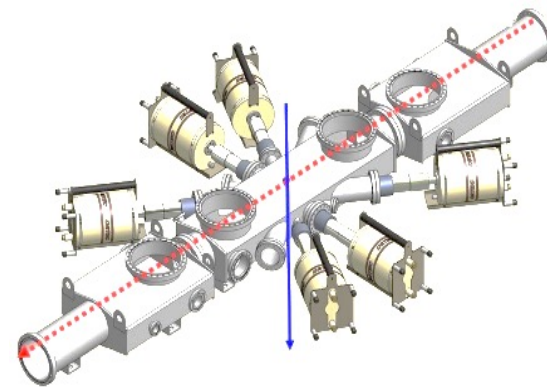
研究强场QED效应、测量核电荷分布半径

• 共振肖特基谱仪



精确测量原子核质量和寿命（半衰期大于10ms）

• 核反应装置



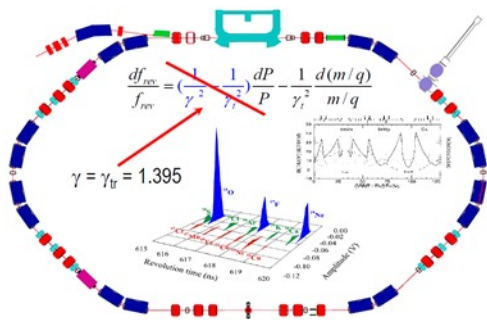
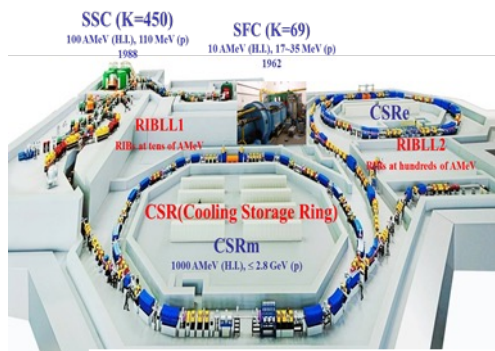
测量反应截面，揭示奇特核结构、理解天体环境核过程

等时性模式核质量谱仪

国际精度最高的环形核质量谱仪

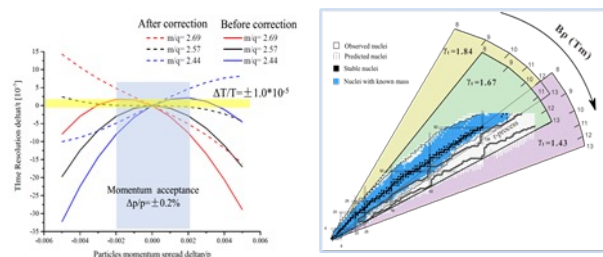
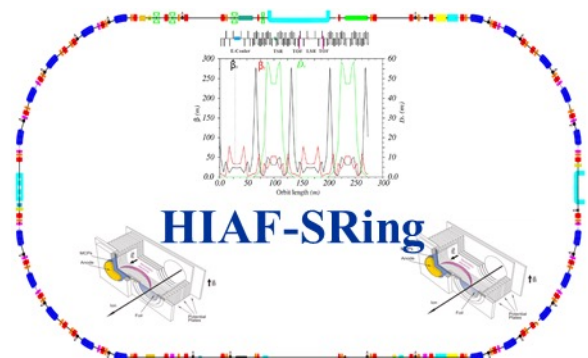
世界上首次采用双TOF方案

HIRFL-CSRe



首次测量质量: 32个, 提高质量精度: 50个

$\Delta M/M \sim 10^{-7}$

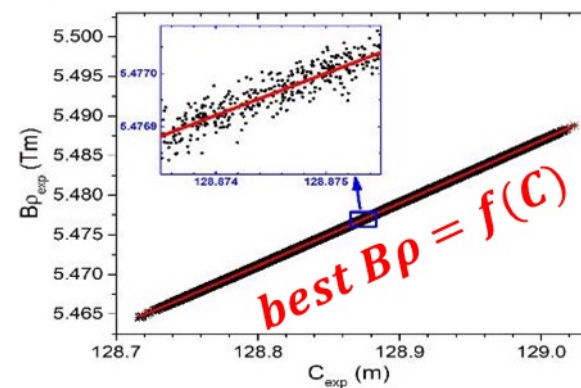
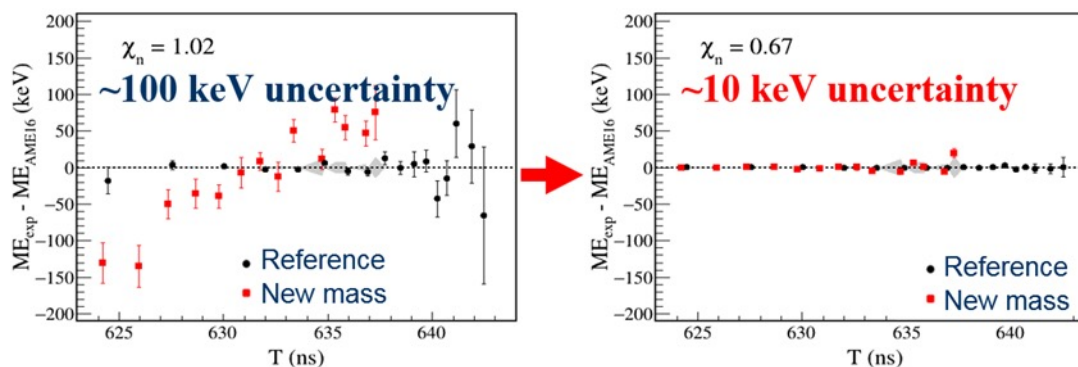


$\Delta M/M \sim 10^{-7} - 10^{-8}$

首创 $B\rho$ - defined 等时性质谱术

传统的IMS

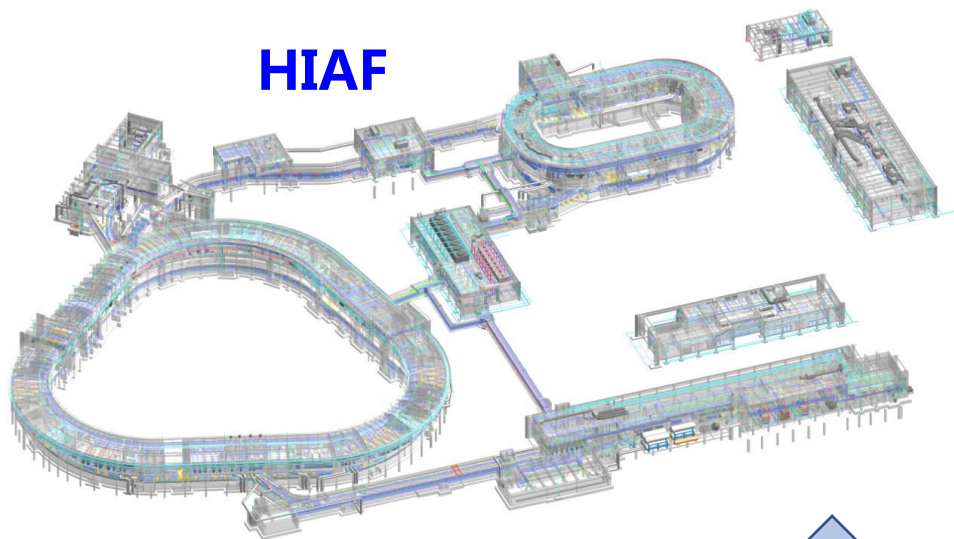
$B\rho$ -defined IMS



最先进的储存环质谱术: 高精度; 消除系统误差; 宽频谱测量; 单离子灵敏; 零本底; 可用于短寿命

3 重离子加速器重大应用

创新动力学方案和核心关键技术实现了很好的转移转化

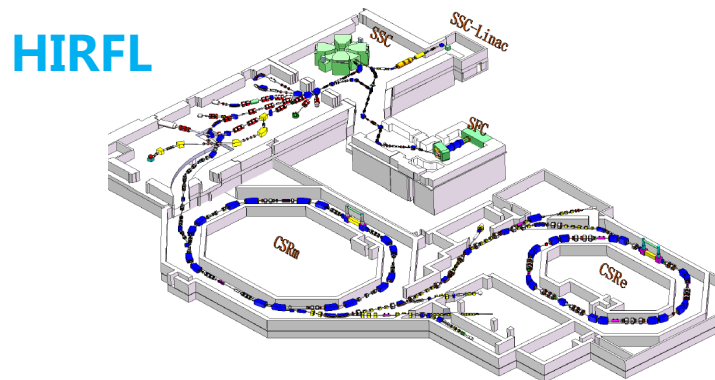


HIAF



PREF

质子位移损伤装置



HIRFL

兰州重离子加速器研究装置

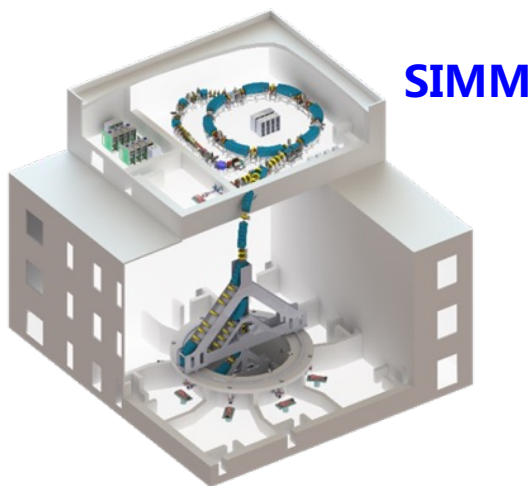


强流重离子加速器装置



SESRI

空间地面模拟装置离子加速器



SIMM

新一代重离子治疗装置



HIMM

首台国产医用重离子加速器

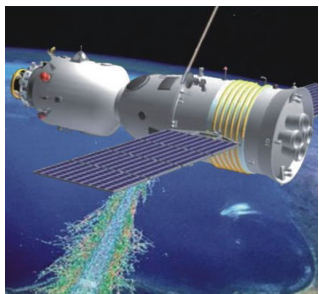


研发了面向人民生命健康和航天空间重大战略需求的应用装置

重大应用1：航天空间辐照效应研究离子加速器

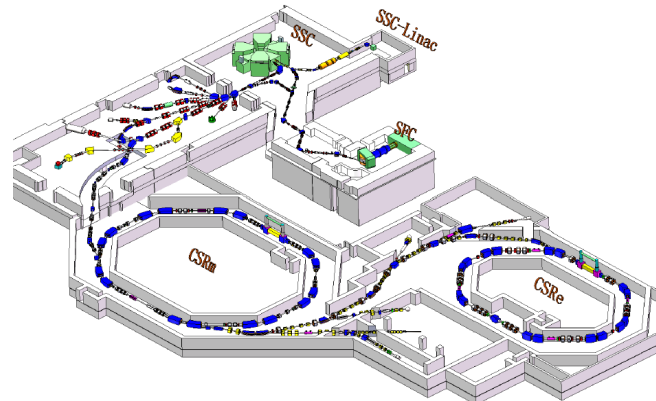
负责建造了我国空间环境地面模拟装置离子加速器和质子位移损伤效应模拟试验装置，为航天空间辐照研究发挥了重要作用

空间环境



离子加速器是空间环境地面模拟不可替代装置

离子加速器是空间环境地面模拟不可替代装置
物理突出一枝
李政道
九〇年六月



兰州重离子加速器-HIRFL

国内仅有的高LET装置，满足了大量卫星研制和发射任务辐照需求

机时严重短缺，远远不能满足我国航天深空探测发展的需求



空间环境地面模拟装置-SESRI

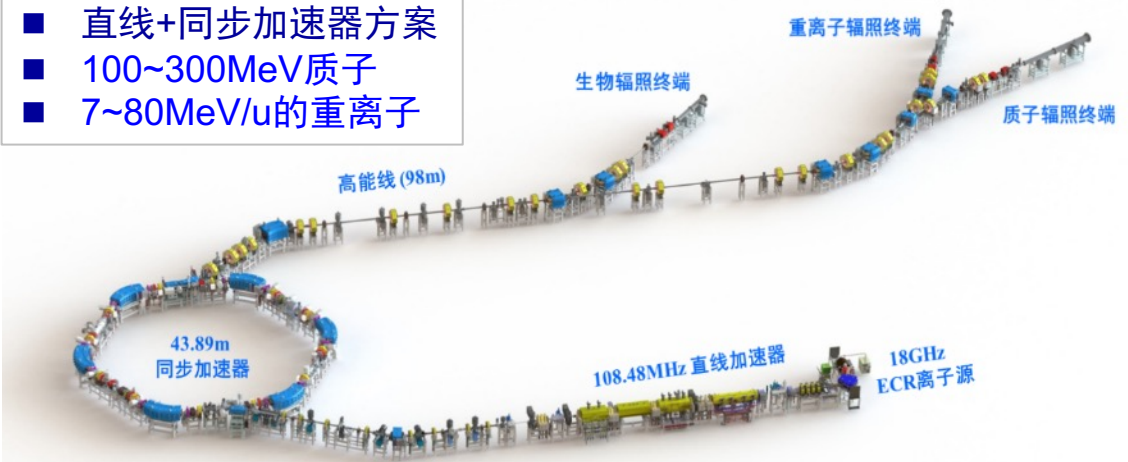


质子位移损伤效应模拟试验装置-PREF

空间环境地面模拟装置-SESRI

国家重大科技基础设施中长期发展规划：十二五建设项目

- 直线+同步加速器方案
- 100~300MeV质子
- 7~80MeV/u的重离子



我国首台质子与重离子束空间环境模拟专用研究装置，将为我国载人航天、空间站建设等重大航天工程元器件辐照发挥重要作用

300MeV 质子重离子加速器验收评审意见

2022年12月28日，哈尔滨工业大学组织了线上验收会议（视频会议号：296-668-638），对中国科学院近代物理研究所研制的“300MeV 质子重离子加速器”进行验收评审。

验收评审组长由中国科学院上海高等研究院赵建堂院士担任，评审专家组成员由中国科学院上海高等研究院、中国科学院物理研究所、中国科学院近代物理研究所、中国科学院高能物理研究所、北京大学、四川大学、西北核技术研究所、哈尔滨工业大学、黑龙江省原子能研究所和中科院、在会专家等十一人。

专家组听取了中国科学院近代物理研究所关于“300MeV 质子重离子加速器”的研制总体报告，听取了哈工大关于测试和试运行、文件和设备清单提供的情况介绍，审核并认可了测试专家的测试结果。经质询与讨论，专家组形成意见如下：

1. 中国科学院近代物理研究所完成了合同要求的全部内容，束流测试结果可信，束流参数均达到或优于设计指标，所提交的文件及设备齐全；
2. 加速器试运行期间具备良好的稳定性和可靠性，已具备对标实验能力；
3. 加速器整体性能达到国际先进水平，在低能离子超大发射度慢引出方面 (>95%) 达国际领先水平。

专家组一致同意通过“300MeV 质子重离子加速器”设备验收。

评审专家组组长：赵建堂
2022年12月28日

测试专家组认为：束流参数均满足或优于指标要求，加速器整体性能达国际先进水平，在低能离子超大发射度慢引出方面 (>95%) 达国际领先水平

使（试）用证明

| | |
|---------|--------------------------|
| 设施名称 | 哈尔滨工业大学空间环境地面模拟装置(SESRI) |
| 使（试）用单位 | 中国科学院近代物理研究所 |
| 时间 | 从2022年12月10日至2023年1月5日 |

2022年12月10日、12月19日和2023年1月5日，中国科学院近代物理研究所哈尔滨工业大学空间环境地面模拟装置的300MeV 质子重离子加速器和器件离子辐照终端，利用高能质子束和重离子束开展了CSOI SRAM、SOI SRAM、SiC MOSFET和VDMOS等新型抗辐射集成电路芯片和功率器件的辐照实验，首次获得了LET 超过110MeV·cm²/mg的重离子辐照下的单粒子翻转数据，为先进制程CSOI工艺的加固技术研究提供更全面的器件辐照数据，为先进制程CSOI工艺的加固技术研究提供更全面的器件辐照数据，为先进制程CSOI工艺的加固技术研究提供更全面的器件辐照数据。

中国科学院近代物理研究所是我国核辐射芯片的牵头研究机构，在国内率先突破了抗辐射SOI大容量存储器和抗辐射功率MOS器件的加固技术，基于自主知识产权的抗辐射0.25-0.13微米SOI CMOS工艺研制出多种新型、高集成度辐射芯片产品，抗辐射性能达到国际先进水平。哈尔滨工业大学为中国科学院近代物理研究所的重要支撑单位，为核辐射芯片器件研制和型号应用做出了重要贡献。

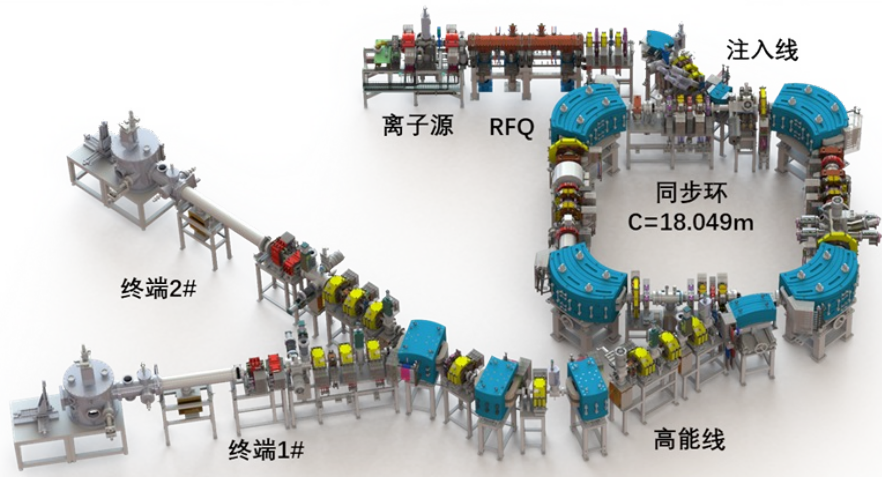
特此证明

试运行期间，为国内20余家合作单位提供约1200h机时；已经开始正式运行，年机时>6500小时

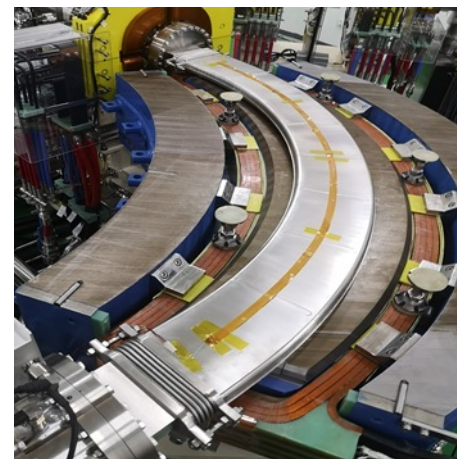


质子位移损伤效模拟试验装置-PREF

世界首台10-60MeV段能量连续精确可调、可实现单能质子输出的同步加速器，将填补我国空间辐射效应试验能力缺项，满足新型器件空间位移损伤试验评估需求



变前励全储能快速率磁铁电源



超薄壁钛合金骨架真空室



高梯度磁合金高频系统

2023年8月8日调试成功，实现了从“一天”到“一键”的突破，核心束流参数超设计值

成果鉴定

专家意见：
在国际上首次研制出超紧凑型10-60 MeV 低能同步质子同步加速器，成功应用于我国空间科学、空间技术和国防航空元器件的研制和发展。通过创新解决了全谱化、非谐振、4倍倍频同步加速极子共振中频不可变关键难题。整体技术处于国际领先水平，具有重大的社会价值。

专家签字：方月石
2023年12月19日

“技术创新度达到7级（最高级，创新点在国际范围内未见相同文献报道），技术先进度达到7级（最高级，指标超过国际标准，处于国际同领域的领先水平）；入选2023年度中国核领域十大进展

已为航天电子元器件辐照提供十余种能量的质子束

重大应用2：精准放疗重离子加速器

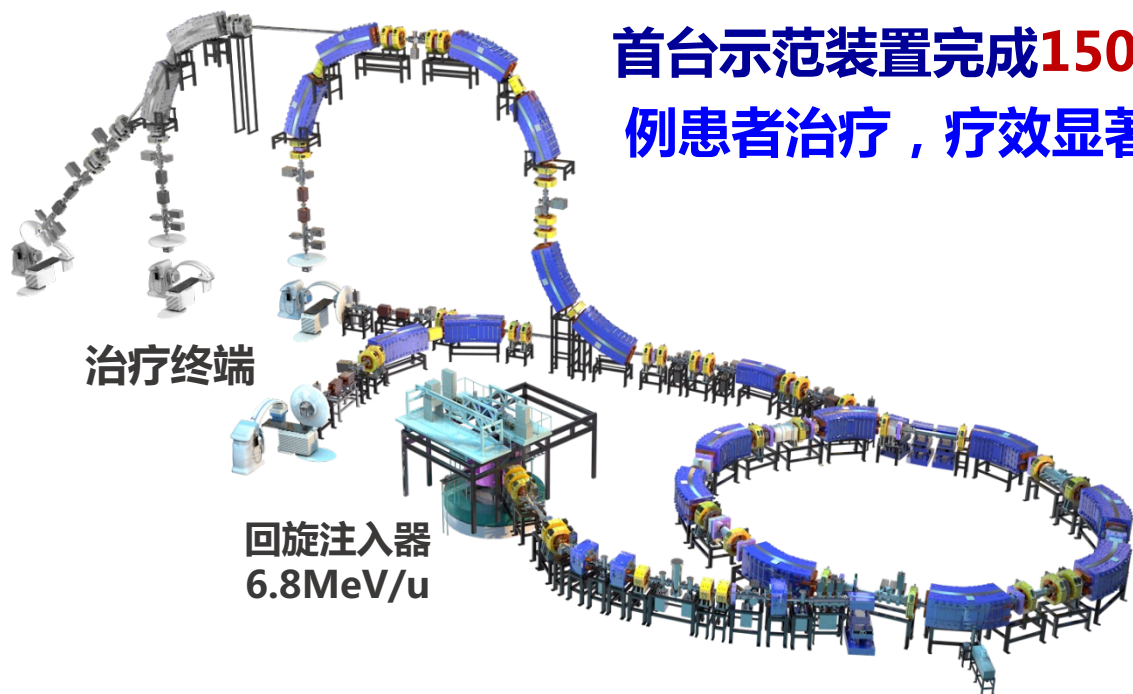
医用重离子加速器、磁共振、彩超、CT等高端医疗装备国产化替代取得重大进展

——习近平，2021年5月28日，在中国科学院第二十次院士大会、中国工程院第十五次院士大会和中国科学技术协会第十次全国代表大会上的讲话

国内**9**台医用重离子加速器

建成了我国首台自主知识产权的医用重离子加速器

首台示范装置完成**1500**
例患者治疗，疗效显著



武威重离子医院



兰州重离子医院



福建妈祖重离子医院



武汉大学重离子医学中心
暨汉南区人民医院



浙江省肿瘤医院



南京国科重离子医院



吉林白求恩重离子医院



山东省肿瘤医院

国际第一代治疗装置（德国、日本、中国）现状

- ① **占地面积大**：4000m²-5000m²，同步加速器的周长，束线系统长而复杂
- ② **束流配送效率低**：单条束线对应单个治疗室，治疗室数量有限（3-4）

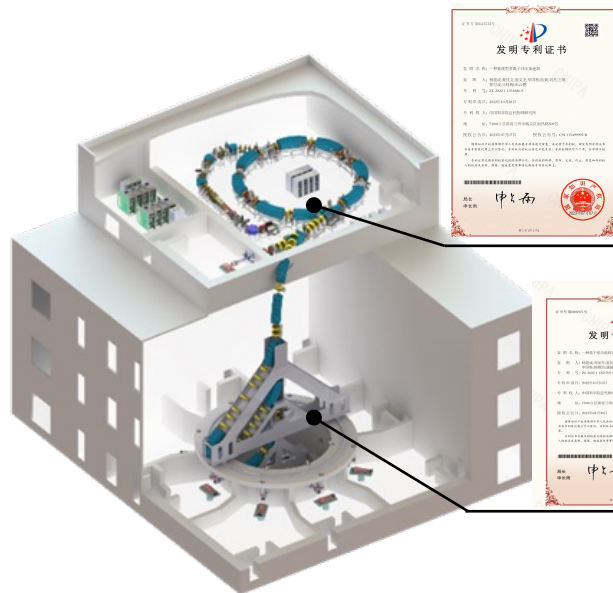
国际首台“回旋注入+同步主加速器”
组合模式重离子治癌专用装置

新一代重离子精准放疗装置

中国-新一代

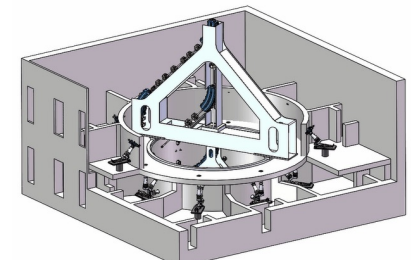
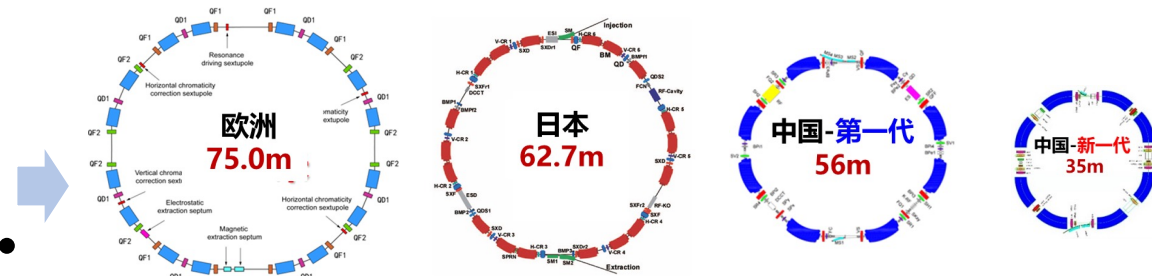
全面国际引领，真正普惠大众

形成了离子大型精准放疗装备核心技术专利集群，获**已授权发明专利22项，受理发明专利8项，相关国际专利正在受理中。**



原创的束流物理与动力学设计，将周长从第一代国际最短的56m减小到35m

国际首创的旋转束线智能高效终端束流配送系统



创新-1：单条旋转束线实现多治疗室照射，将治疗室从(3-4)增加到(8-15)

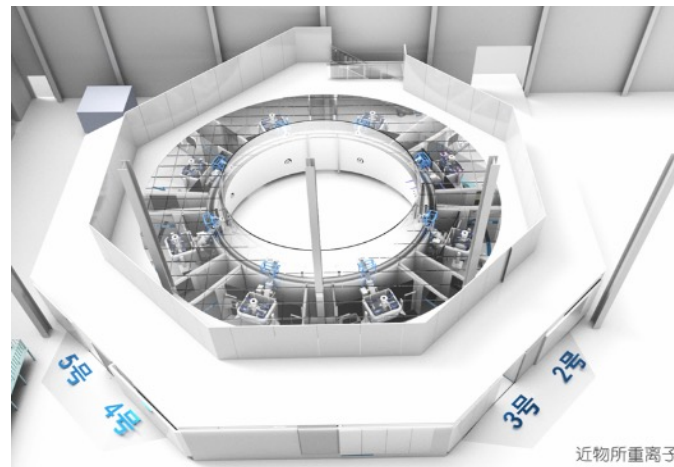
创新-2：每个治疗室可以实现多角度照射，可完全替代复杂昂贵的Gantry

装置规模：占地面积从4600m² 减小到1100m²

年治疗病例：从 (1000-1500) 增加到 (2000-5000)

| | 环周长 (m) | 治疗室数量 | 面积 (m ²) | 单次治疗时间 (min) | 配电 (MW) | 年治疗能力 |
|-----|-----------|-------|-----------------------|--------------|-----------|-----------|
| 第一代 | 56 | 4 | ~4600 | ~15min | 10 | 1000-1500 |
| 新一代 | 35 | 8-15 | ~1200 | <1min | 2.5 | 2000-5000 |

新一代重离子治疗装置示范项目



**核心设备加工完成，2025年6月开始
全面设备安装，2025年底建成出束**



高加速梯度的新型RFQ与DTL腔



高功率固态功率源



混合超导强流离子源



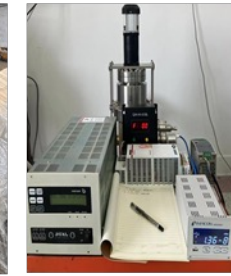
低涡流损耗非晶与纯线圈扫描铁



磁流体密封及骨架异形真空室



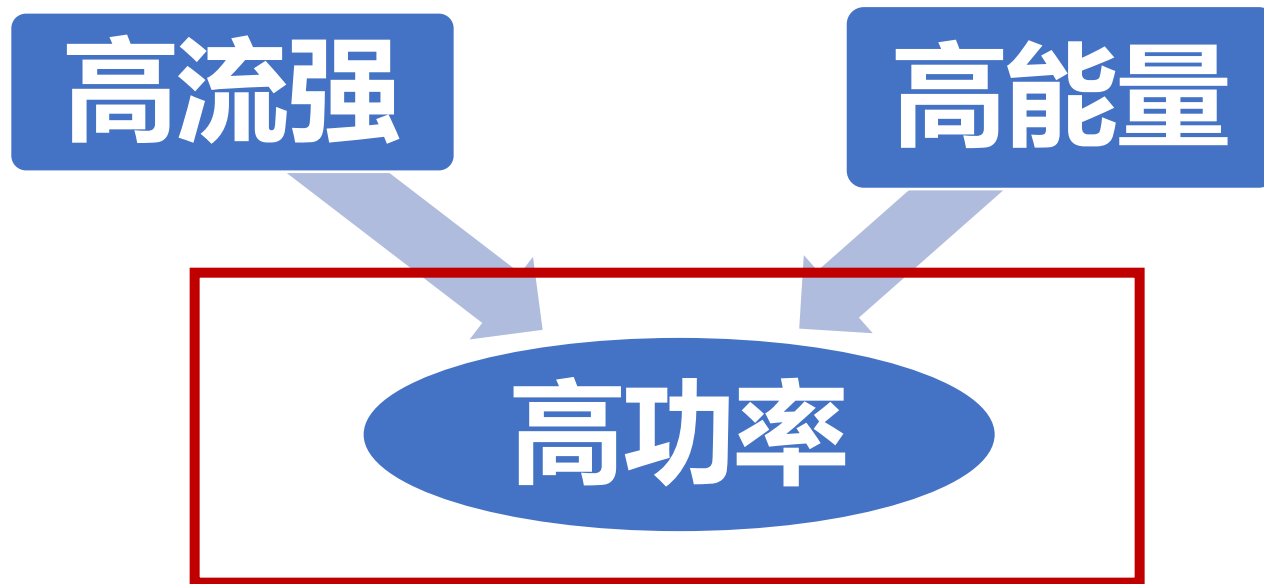
高定位精度旋转机架



让更多的患者都能享受到高科技发展带来的健康福祉，为人民健康贡献重离子力量！

前沿探索

超高重频紧凑型高功率加速器

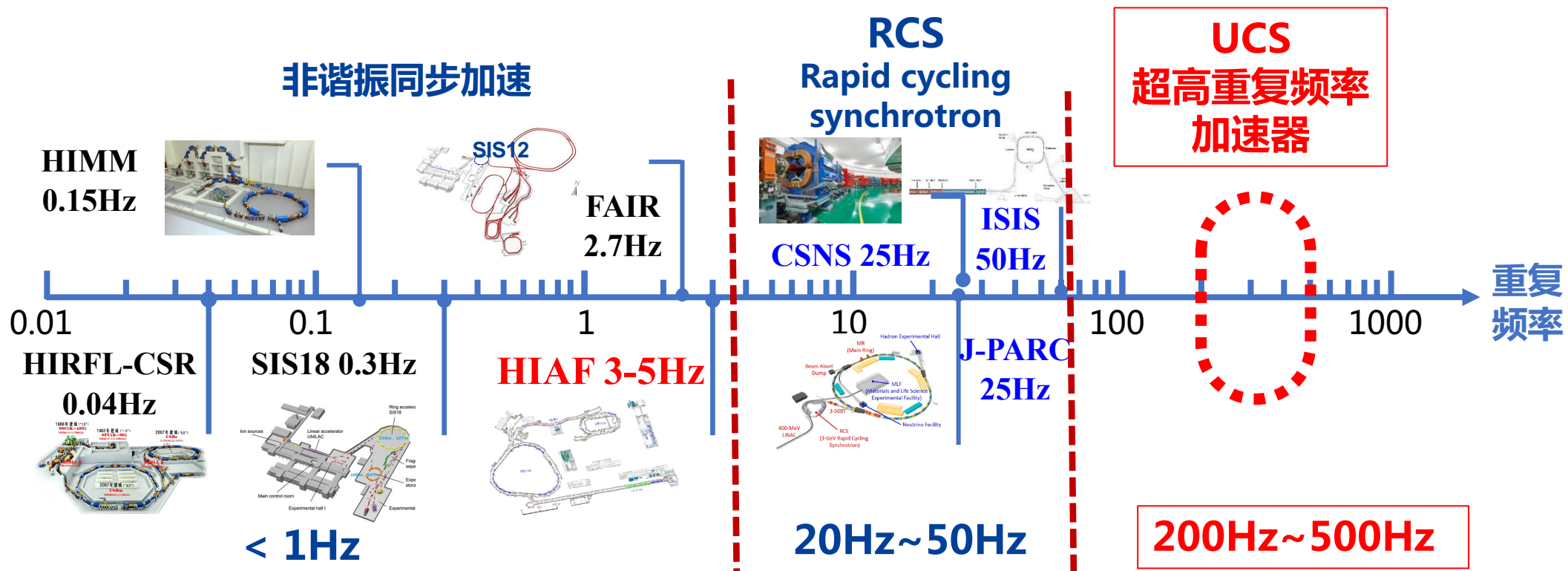


重复频率 × 束流流强 × 束流能量

设计了创新的动力学方案，研发了基于全新材料的核心关键技术

超高重频紧凑型高功率加速器 - UCS

快速率加速：谐振正弦波加速和非谐振快速率加速

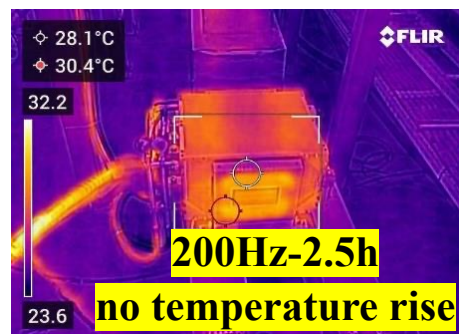


难题和挑战：超快循环束流动力学、极快速率涡流效应、超高重频率动态电源、高梯度快响应纳米晶高频系统

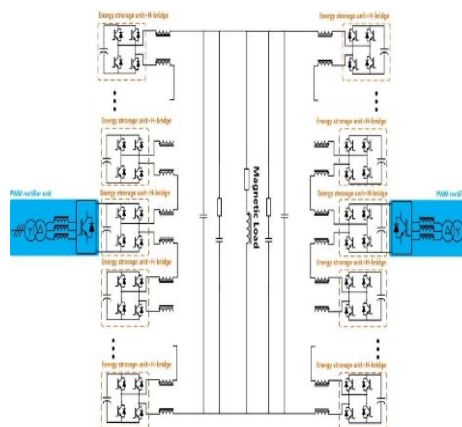
创新：一步一个脚印，一步一个台阶

非谐振快速率加速技术创新突破提供了全新的思路和技术路线

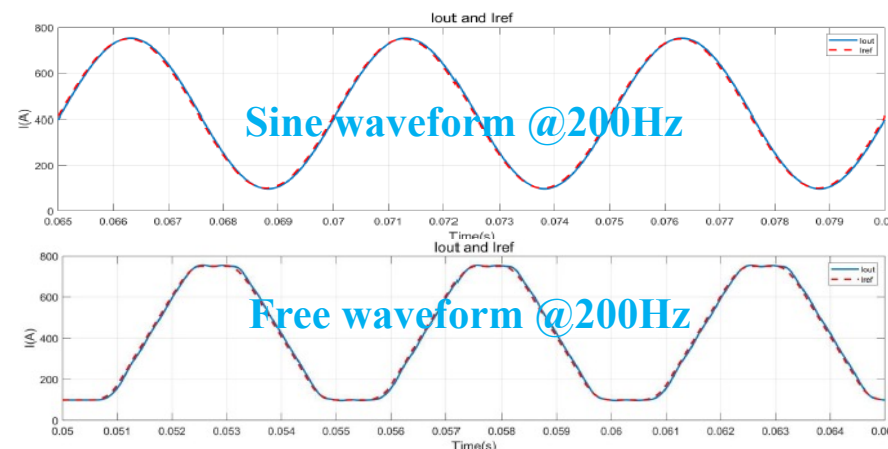
- 国际首次提出基于新一代高性能铁基软磁材料-非晶、铁硅粉的磁铁方案，并在铁芯成型工艺、线圈支撑结构等方面取得重大突破



- 提出了全新的超快循环电源拓扑结构和工艺方案，成功研制了样机，完成了原理验证



- 率先提出了基于特种PEEK材料超高真空室全新方案，解决了涡流发热和集体束流不稳定性

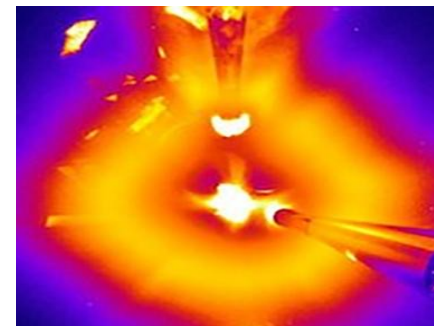


超快循环高功率紧凑型加速器 - UCS

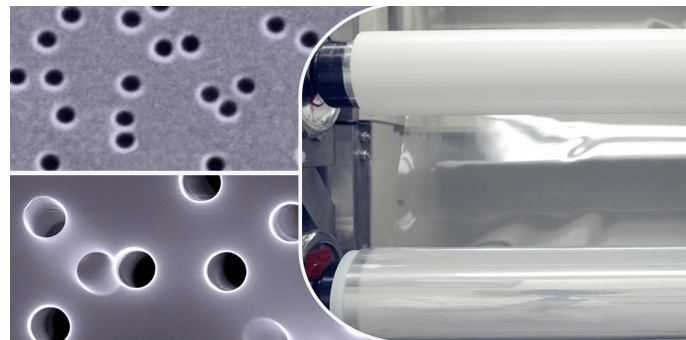
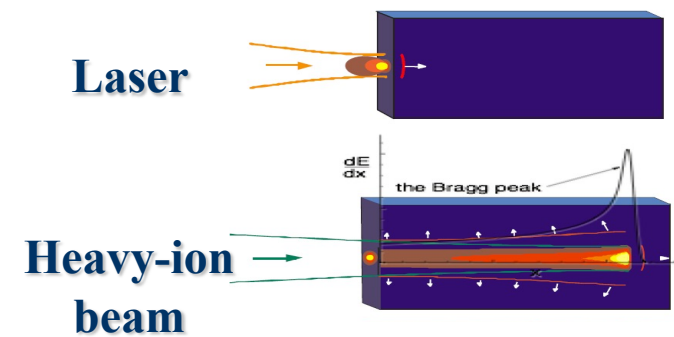
高功率束流制备是国际核技术领域的重要发展方向，将极大地推动高通量小型中子源、高能量密度物理、离子驱动聚变研究等**国家重大战略需求**，以及埃尺度核孔膜生产、重离子癌症治疗、医用同位素研发等**重大产业应用**快速发展



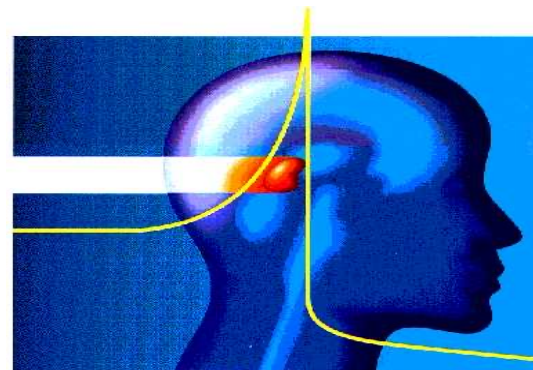
高通量中子源



高能量密度物理及重离子驱动聚变研究



核孔膜生产



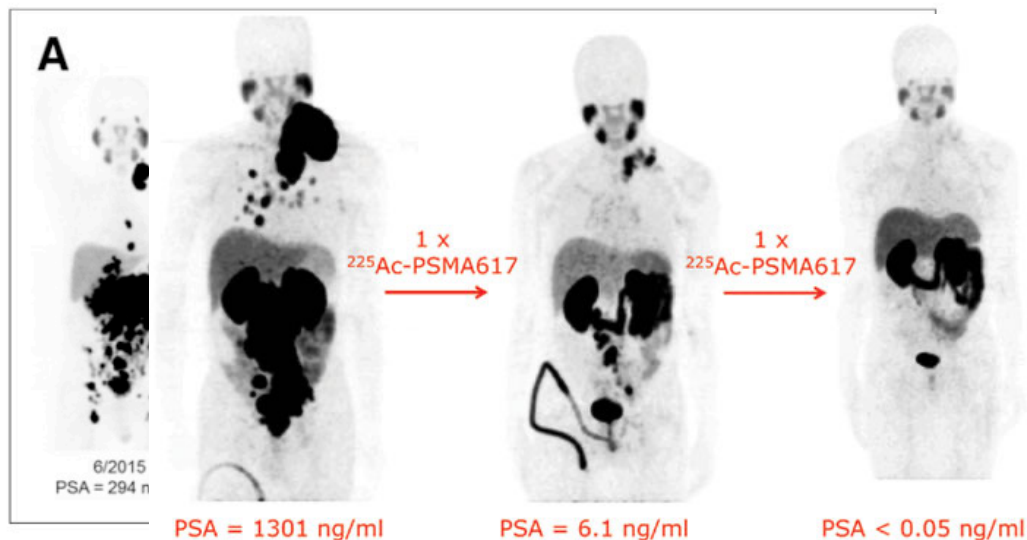
重离子治疗癌症



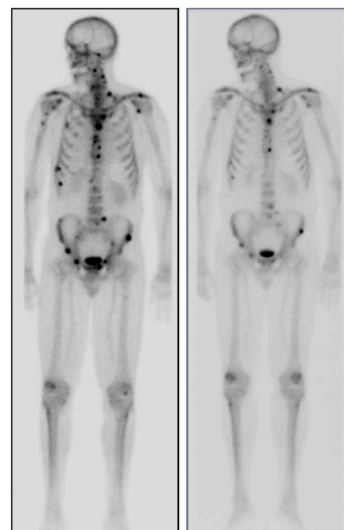
医用同位素生产

α 同位素药物（靶向药物内照射）研发

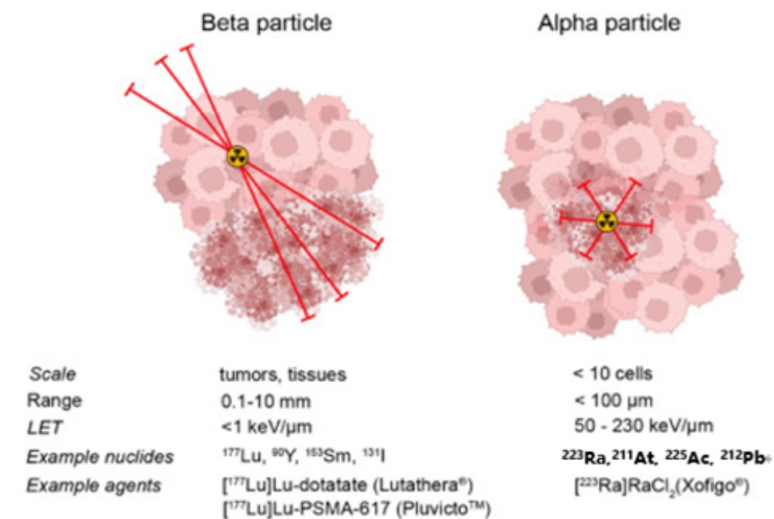
- 放射性同位素广泛应用于**癌症诊疗、心肌成像、心脏疾病诊断及神经退行性疾病状态监测**等；



^{225}Ac -PSMA前列腺放疗



$^{223}\text{RaCl}_2$ 靶向骨癌放疗

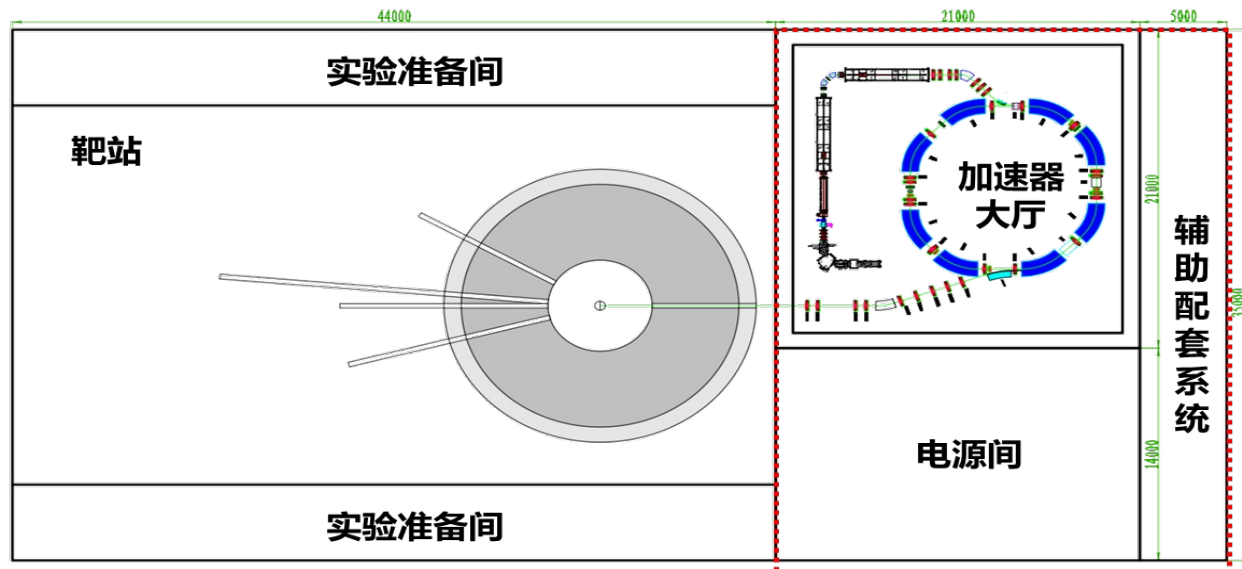


- 我国 > 90% 医用同位素进口，短缺、断供；面临被“卡脖子”风险； α -同位素产生截面低，产额低、纯度低、化学分离难度大、全世界奇缺，核心技术属核不扩散军控，西方国家严格管控，限制出口；美国上升为国家战略，BNL、LANL等国家实验室研发和生产

核心技术挑战：放射性同位素产生、高效分离和提取、靶向药物研发

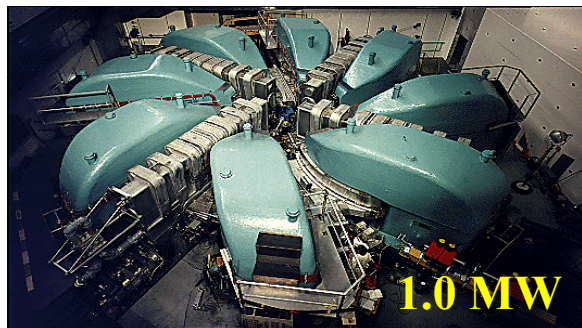
超高重频 α 同位素药物生产加速器

总体方案：紧凑高梯度直线加速器 + 强流快循环同步加速器($\sim 200\text{Hz}$)

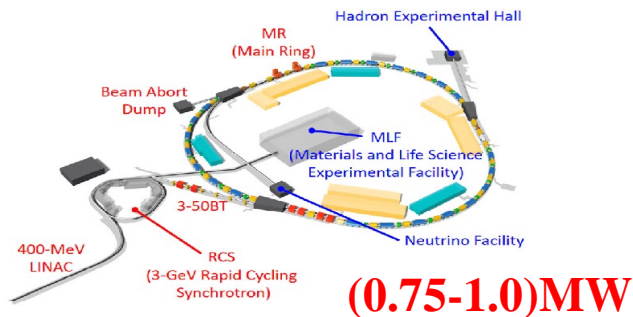


主要参数：

- 加速器占地面积：26m × 35m
- 流强 (${}^9\text{Be}^{3+}$, ${}^4\text{He}^{2+}$)
 - 平均： 1×10^{15} pps
 - 脉冲： 5×10^{12} pps @ 150ns
- 能量：500MeV-1000MeV
- 功率：200kW-1.0MW



The SINQ sector cyclotron at PSI



J-PARC facility in Japan



SNS at Oak Ridge in US

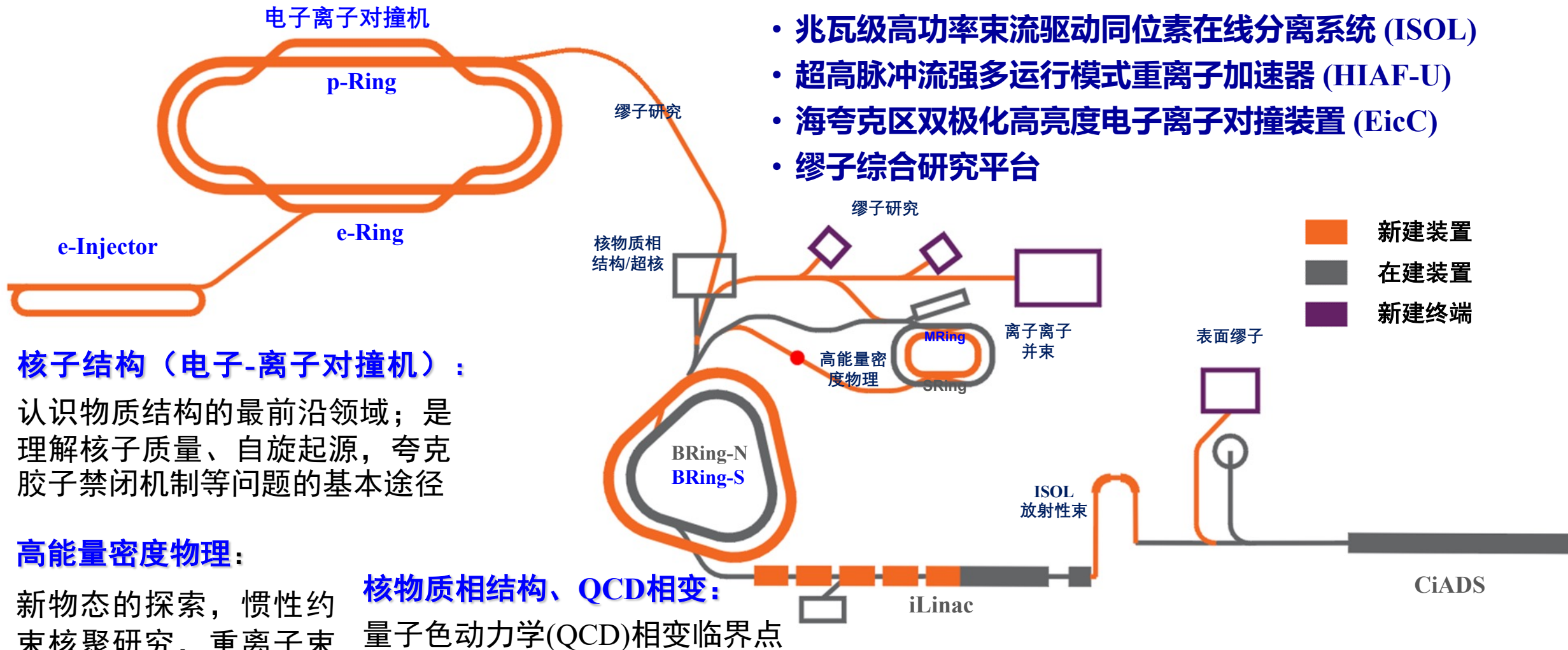
占地：几百到上千亩
 造价：几十到上百亿
 周期： \sim 十年

突破我国自主研发 α 同位素量产技术，解决“同位素”原料供给问题

4 总结和展望

中国强流、高功率、高亮度离子加速器集群

CNUF-China advanced Nuclear physics research Facility



占地5000亩, 2035-2040年建成

科研：核心需求驱动，重大应用牵引



中华人民共和国国家原子能机构
China Atomic Energy Authority

国家原子能机构等十二部门关于印发

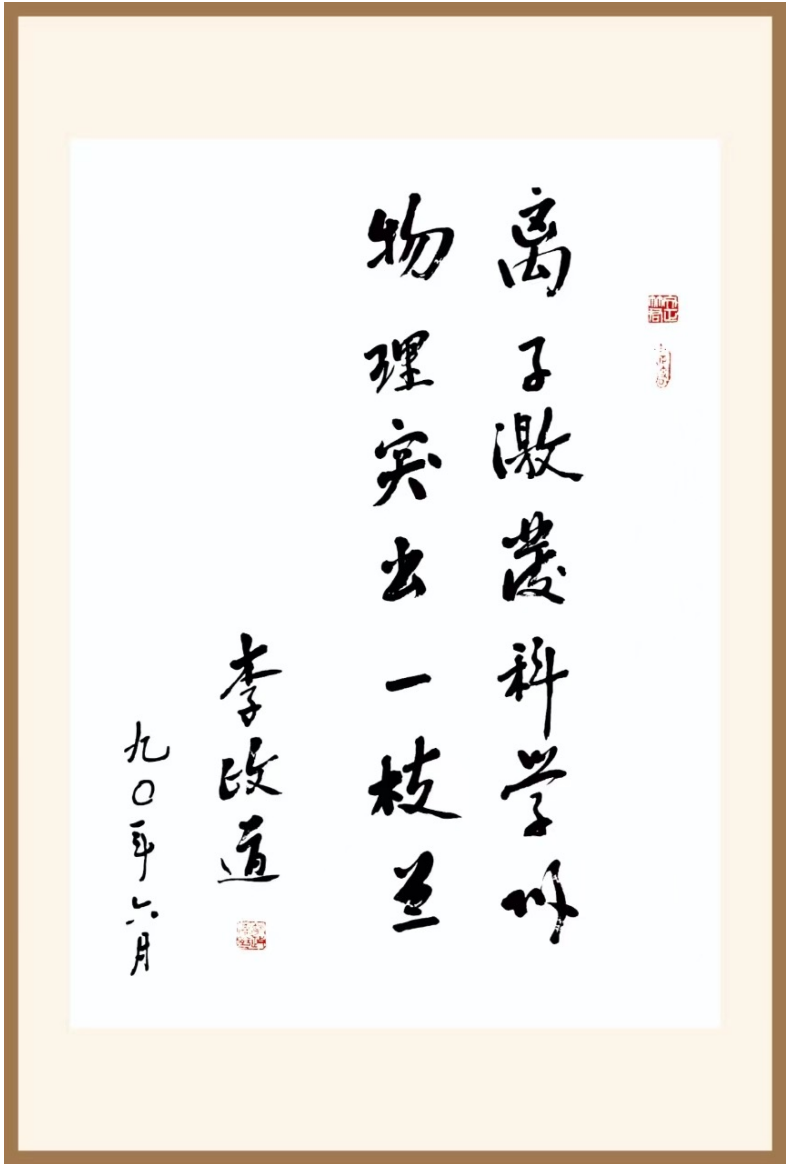
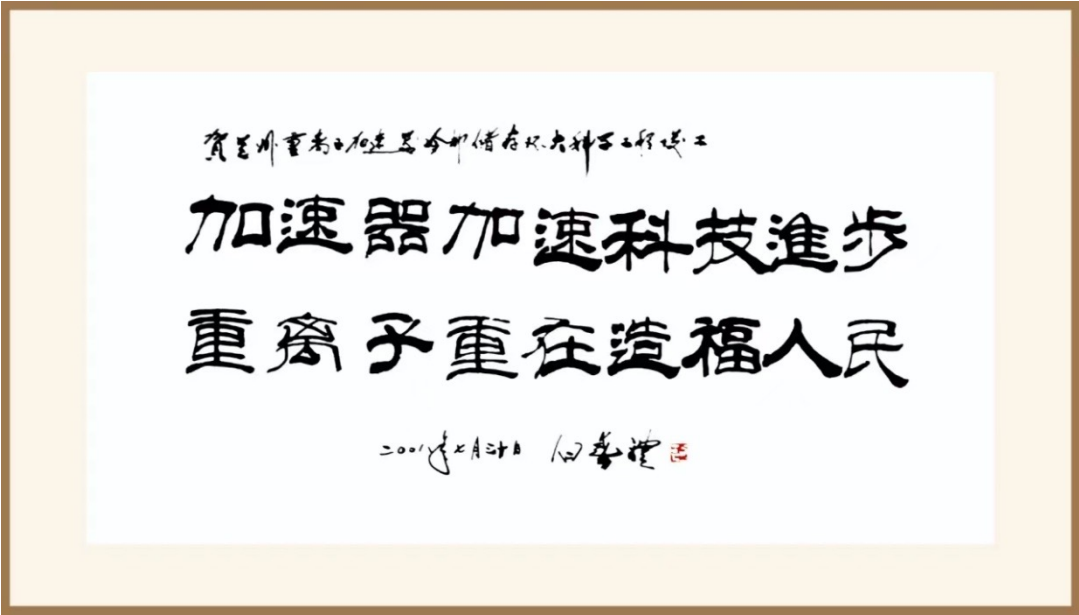
《核技术应用产业高质量发展三年行动方案

(2024-2026年)》：

核技术相关产业具有**高科技、高效能、高质量特征**。发展核技术应用产业是适应新一轮科技革命和产业变革，拓展核技术应用领域，促进核工业高质量发展的必然趋势，**是支撑国民经济各领域转型升级、提质增效的重要赋能手段。**

国家原子能机构核技术（重离子束应用）研发中心

| 序号 | 名称 | 依托单位 | 归口管理单位 |
|----|--------------------------|---|----------------|
| 1 | 国家原子能机构核技术（先进辐射源）研发中心 | 主依托单位：中国工程物理研究院物理研究所 依托单位：北京应用物理与计算数学研究所、四川玖谊源粒子科技有限公司 | 中国工程物理研究院 |
| 2 | 国家原子能机构核技术（核医学诊疗与转化）研发中心 | 主依托单位：山西医科大学 依托单位：山西医科大学第一医院 | 山西省国防科学技术工业办公室 |
| 3 | 国家原子能机构核技术（安检安保）研发中心 | 主依托单位：同方威视技术股份有限公司 | 中国核工业集团有限公司 |
| 4 | 国家原子能机构核技术（重离子束应用）研发中心 | 主依托单位：中国科学院近代物理研究所 | 中国科学院 |
| 5 | 国家原子能机构核技术（电子束固化应用）研发中心 | 主依托单位：无锡爱邦辐射技术有限公司 依托单位：江苏集萃光敏电子材料研究所有限公司 | 江苏省国防科学技术工业办公室 |



粒子子加速器：

既能顶天：服务世界一流顶尖科研！

也能立地：要造福人民，服务国家战略需求！

衷心感谢各位专家、老师、同行的支持！

谢谢大家的聆听！

欢迎批评指正！